



VŠB – Technická univerzita Ostrava

Univerzitní studijní program

Elektrický dělič výkonu pro použití v hybridních vozidlech

Electric Power Divider for Hybrid Vehicles

Diplomová práce

Student:

Bc. Jan Bílek

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Petr Chlebiš, CSc.

Ostrava, 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Univerzitní studijní programy
Katedra elektroniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Bílek**
Studijní program: N3943 Mechatronika
Studijní obor: 3906T007 Automobilová elektronika
Téma: **Elektrický dělič výkonu pro použití v hybridních vozidlech**
Electric Power Divider for Hybrid Vehicles

Zásady pro vypracování:

1. Analyzujte možnosti koncepčního řešení pohonné jednotky hybridních vozidel
2. Popište princip a analyzujte provozní stavy pohonu hybridního vozidla s využitím dělice výkonu.
3. Navrhněte výkonovou strukturu přenosu výkonu s využitím akumulace energie.
4. Chování soustavy analyzujte ve statických i dynamických režimech s využitím numerických simulací.

Seznam doporučené odborné literatury:

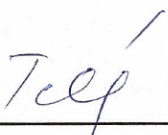
- [1] Ehsani, Mehrdad, a další. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. Illinois : CRC Press, 2005. ISBN 0-8493-3154-4.
- [2] Cheng, Y.; Cui, S.; Song, L.; Chan, C. C.: The study of the Operation Modes and Control Strategies of an Advanced Electromechanical Converter for Automobiles, IEEE Transactions on Magnetics, January 2007, Washington, DC, USA 2007, vol. 43, p. 430-433, ISSN 0018-9464.
- [3] Bauer, P & Duijsen, PJ van .: Sensorless control for electrical and hybrid electric vehicles. Bodo's power systems, 2009, 11, 50-52.
- [4] Zoroofi, Siavash. Modeling and Simulation of Vehicular Power Systems. Göteborg : Chalmers University of Technology, 2008. ISSN 1652-8557.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Petr Chlebiš, CSc.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 15.05.2013


doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Petr Noskiewič, CSc.
průrektor pro studium

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Elektrický dělič výkonu pro použití v hybridních vozidlech* vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Petra Chlebiše, CSc. a uvedl v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

V Ostravě dne 15.5.2013

vlastnoruční podpis autora

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 15.5.2013

.....
podpis

Bc. Jan Bílek

Alberta Kučery 1200/10,
Ostrava – Hrabůvka
700 30

Poděkování:

Rád bych poděkoval prof. Ing. Petru Chlebišovi, CSc. a doc. Ing. Ivo Neborákovi, CSc. za jejich cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěli k vypracování této diplomové práce.

Abstrakt

Předmětem diplomové práce *Elektrický dělič výkonu pro použití v hybridních vozidlech* je analyzovat koncepční řešení pohonné jednotky hybridních vozidel a na základě této koncepce navrhnout a popsat strukturu elektrického děliče pro hybridní vozidlo. Cílem je vytvořit simulační model pohonu hybridního vozidla s využitím děliče výkonu a akumulace energie, který bude v budoucnu sloužit jako jeden z ověřovacích dokumentů pro vývoj fyzického modelu pohonné jednotky. Numerickým simulačním modelem budou popsány provozní stavy pohonu hybridního vozidla a energetické přenosy v rámci hybridního systému.

Abstract

The subject of diploma thesis *Electric Power Divider for Hybrid Vehicles* is to analyze concept solutions of drive unit in hybrid vehicles and to design and describe a structure of electric divider for hybrid vehicle based on this concept. The objective is to create a simulation model of vehicle's hybrid drive with application of power divider and energy accumulation, which will be used as one of verification documents for development of a physical model of hybrid drive unit in the future. The numerical simulation model will describe operational states of vehicle's hybrid drive and energy transfers in terms of hybrid system.

Klíčová slova

Hybridní pohon, dělič výkonu, akumulace energie, energetické vazby, asynchronní stroj

Keywords

Hybrid drive, electric divider, energy accumulation, energy relations, asynchronous machine

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	8
ÚVOD.....	11
1.1 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ POHONNÉ JEDNOTKY HYBRIDNÍCH VOZIDEL	13
1.2 ARCHITEKTURY HYBRIDNÍCH POHONŮ	16
1.2.1 SÉRIOVÝ HYBRIDNÍ POHON	18
1.2.2 PARALELNÍ HYBRIDNÍ POHON S MECHANICKOU SPOJKOU	21
1.2.3 PARALELNÍ HYBRIDNÍ POHON S MOMENTOVOU VAZBOU.....	22
1.2.4 JEDNOTLIVÁ PROVEDENÍ POHONNÝCH JEDNOTEK S MOMENTOVOU SPOJKOU.....	23
1.2.5 PARALELNÍ HYBRIDNÍ POHON S OTÁČKOVOU SPOJKOU	28
1.2.5.1 Zařízení s otáčkovou spojkou.....	28
1.2.5.2 Provedení pohonných jednotek s otáčkovou spojkou.....	32
1.2.6 HYBRIDNÍ POHONNÉ JEDNOTKY S OBĚMA DRUHY SPOJEK.....	35
1.2.6.1 Pohonná jednotka s nastavitelnou spojkou.....	35
1.2.6.2 Pohonná jednotka s oběma režimy spojky.....	36
2.1 PROVOZNÍ STAVY HYBRIDNÍ POHONNÉ JEDNOTKY.....	40
2.2 STATICKÉ VÝPOČTY HYBRIDNÍ POHONNÉ JEDNOTKY S DĚLIČEM VÝKONU	44
2.2.1 VÝPOČETNÍ VZTAHY STATICKÉHO MODELU HYBRIDNÍ POHONNÉ JEDNOTKY	45
2.2.2 ELEKTRICKÝ MODEL HYBRIDNÍ POHONNÉ JEDNOTKY	45
2.2.2.2 Výpočty výkonů v modelu hybridní jednotky.....	46
2.2.3 SIMULAČNÍ MODEL V PROGRAMU MATLAB SIMULINK	49
ZÁVĚR	62
POUŽITÁ LITERATURA A REFERENCE.....	64

Seznam použitých symbolů a zkratk

Zkratka	Význam	
ABS	Bezpečnostní systém brzdění kol (Anti-blocking system)	
DC	Stejnoseměrný stroj (direct current)	
Symbol	Význam	Jednotka
e	Transformační poměr statoru k rotoru asynchronního stroje	[-]
f_r	Frekvence indukovaného napětí rotoru	[Hz]
f_s	Frekvence napájecího napětí statoru	[Hz]
c_{fl}	Koeficient aerodynamického odporu	[-]
i_{1-2}	Převodový poměr mezi centrálním a korunovým kolem	[-]
i_g	Převodový poměr planetového převodu	[-]
I_m	Magnetizační proud	[A]
I_r	Proud rotorovým vinutím	[A]
I_s	Proud statorovým vinutím	[A]
k_1	Strukturální parametr spojky	[-]
k_2	Strukturální parametr spojky	[-]
L_r	Indukčnost rotorového vinutí	[H]
M_1	Moment generátoru	[Nm]
M_3	Výstupní moment spojky	[Nm]
M_e	Moment elektromotoru	[Nm]
M_k	Moment zátěže korunového kola	[Nm]
M_m	Moment motoru	[Nm]
M_o	Výstupní moment motoru	[Nm]
M_{opt}	Moment spalovacího motoru	[Nm]
M_{max}	Moment zvratu	[Nm]
M_{PM}	Moment pracovního mechanismu	[Nm]
M_r	Moment rotoru	[Nm]
m_{h1}	Hmotnost vstupní hřídele generátoru	[kg]
m_{r1}	Hmotnost rotoru generátoru	[kg]

Symbol	Význam	Jednotka
n_1	Výstupní otáčky dvourotorového motoru	$[\text{min}^{-1}]$
n_{opt}	Otáčky spalovacího motoru	$[\text{min}^{-1}]$
n_s	Synchronní otáčky stroje	$[\text{min}^{-1}]$
p	Počet pólových páru stroje	$[-]$
P_0	Výkon naprázdno	$[\text{W}]$
P_1	Výkon generátoru	$[\text{W}]$
P_{fr1}	Třecí ztráty v ložiskách generátoru	$[\text{W}]$
P_{m1}	Mechanický výkon generátoru	$[\text{W}]$
P_n	Jmenovitý výkon stroje	$[\text{W}]$
P_{opt}	Výkon spalovacího motoru	$[\text{W}]$
P_{PM}	Výkon pracovního mechanismu	$[\text{W}]$
P_{rotcu1}	Ztrátový výkon v mědi rotoru generátoru	$[\text{W}]$
P_{rotfe1}	Ztrátový výkon v železe rotoru	$[\text{W}]$
P_{stcu1}	Ztrátový výkon v mědi statoru generátoru	$[\text{W}]$
P_{stfe1}	Ztráty v železe statoru	$[\text{W}]$
P_{vm1}	Výkon ve vzduchové mezeře generátoru	$[\text{W}]$
P_{vent}	Ztráty ventilací	$[\text{W}]$
P_{zh1}	Mechanické ztráty od spalovacího motoru po rotor generátoru	$[\text{W}]$
R_1	Poloměr centrálního kola	$[\text{m}]$
R_2	Poloměr korunového kola	$[\text{m}]$
R_3	Poloměr kotvy	$[\text{m}]$
R_{h1}	Průměr vstupní hřídele generátoru	$[\text{m}]$
R_{rot1}	Průměr rotoru generátoru	$[\text{m}]$
R_r	Odpor rotorového vinutí	$[\Omega]$
R_s	Odpor statorového vinutí	$[\Omega]$
s	Skluz stroje	$[-]$
s_1	Skluz generátoru	$[-]$
s_{m1}	Skluz zvratu generátoru	$[-]$

Symbol	Význam	Jednotka
s_v	Relativní skluz mezi spalovacím a dvourotorovým motorem	[-]
U_1	Napájecí napětí statoru	[V]
U_r	Napětí indukované v rotoru stroje	[V]
X_m	Magnetizační reaktance	[Ω]
X_r	Reaktance rotorového vinutí	[Ω]
X_s	Reaktance statorového vinutí	[Ω]
Z_1	Počet zubů centrálního kola	[-]
Z_1	Počet zubů korunového kola	[-]
Z_m	Magnetizační impedance	[Ω]
Z_r	Impedance rotorového vinutí	[Ω]
Z_s	Impedance statorového vinutí	[Ω]
ω_1	Úhlová rychlost motoru	[rad.s ⁻¹]
ω_2	Úhlová rychlost elektromotoru	[rad.s ⁻¹]
ω_3	Výstupní úhlová rychlost spojky	[rad.s ⁻¹]
ω_k	Úhlová rychlost korunového kola	[rad.s ⁻¹]
ω_m	Vstupní úhlová rychlost motoru	[rad.s ⁻¹]
ω_o	Výstupní úhlová rychlost rotoru	[rad.s ⁻¹]
ω_{opt}	Úhlová rychlost vstupní hřídele dvourotorového motoru	[rad.s ⁻¹]
ω_r	Úhlová rychlost rotoru	[rad.s ⁻¹]
ω_{s1}	Synchronní úhlová rychlost magnetického pole generátoru	[rad.s ⁻¹]
ω_{out}	Úhlová rychlost výstupní hřídele dvourotorového motoru	[rad.s ⁻¹]

Úvod

Koncept hybridních automobilů sloužil při svých začátcích jako doplněk pro spalovací motory, který neměl za hlavní úkol snižovat spotřebu paliva, ale spíše zvyšovat výkon motoru. První známé hybridní automobily byly představeny v pařížském autosalonu v roce 1899. Na jejich výrobě pracovaly závody Pieper v Liège a dopravní společnost Vedovelli & Priestly. Automobil vyráběný firmou Pieper byl obdobným hybridním vozidlem s malým vzduchem chlazeným zážehovým motorem v kombinaci s motorem elektrickým s olověnými bateriemi. Baterie byly dobíjeny motorem, když automobil jel z kopce nebo stál, a když nebyl motor schopen poskytnout dostatečný výkon, zapojil se do chodu také elektrický motor. Další hybridní automobil vyráběný firmou Vedovelli & Priestly byl prvním hybridním vozidlem, který byl postaven na základě elektrického automobilu komerčně vyráběného touto firmou. Zadní náprava byla poháněna samostatně dvěma motory. Navíc benzínový motor o výkonu $\frac{3}{4}$ koňské síly byl spojen s generátorem o výkonu 1,1 kW a upevněn na návěsu, kde mohl být tažen za vozidlem a prodloužil tak dojezd nabíjením baterií. [1]

Navzdory všem zkonstruovaným hybridním automobilům, které měly v některých případech i elektrické brzdy, se nikde nevyskytla myšlenka rekuperace energie brzděním. Většina návrhů totiž v té době používala dynamické brzdění odporem.

Na počátku byly hybridní automobily vyráběny, aby podporovaly slabší spalovací motory nebo zlepšily dojezd elektrickým vozidlům. Výrobci tehdy používali omezené elektrické technologie. Po První světové válce už navzdory kreativitě jejich návrhů nemohly hybridní vozidla konkurovat novějším benzínovým motorům, kterým se rapidně zvýšil výkon a efektivita (zmenšení rozměrů), a tak už nebylo zapotřebí spolupráce spalovacího motoru s elektromotorem. Navíc rizika spojená s elektromotory a olověnými bateriemi způsobila úplné stažení hybridních vozidel z trhu.

I přes stažení hybridních automobilů z trhu nastal problém s řízením elektrických strojů, a jelikož se výkonová elektronika začala rozvíjet až v polovině 60. let, byly tehdejší elektrické motory ovládány mechanickými spínači a rezistory, a toto řešení mělo navíc omezené vlastnosti, které se nedaly použít k efektivnímu využití elektrickým strojů.

K rozvoji moderních hybridních vozidel přispěl Dr. Victor Wouk, který se svými kolegy v roce 1975 zkonstruoval hybridní verzi automobilu Buick Skylark. Vozidlo bylo poháněno rotačním motorem s manuálním řazením v kombinaci s DC strojem umístěným vpředu na převodovce a pro jeho nabíjení bylo použito osm 12 V baterií. [1]

V období 70. a 80. let vznikaly další snahy o zlepšení dojezdu elektromobilů, které se nedostaly na trh a výrobu prototypů, které se měly sériově vyrábět. I přes dvě ropné krize v roce 1973 a 1977 a rostoucí zájmy o životní prostředí se žádný z těchto pokusů o obnovení postavení elektromobilů na trh nedostal.

Největší rozvoj hybridních vozidel začal poté v 90. letech. Motorová společnost Ford vyhlásila „Ford Hybrid Electric Vehicle Challenge“, ve které podpořila snahu univerzit o vývoj hybridních automobilů. Automobiloví výrobci z celého světa vytvářeli prototypy, které dosáhly velkého úspěchu v rámci úspory paliva s využitím spalovacího motoru.

Největším dílem se na vývoji a komercializaci hybridních vozidel zasadili japonští výrobci, zejména v roce 1997 byla na trh v Japonsku uvedena Toyota Prius a Honda Insight a Civic.

V dnešní době, vzhledem k obrovskému vývoji elektroniky, požadavkům na životní prostředí, úspoře paliva a dalších faktorům, je standardem každé automobilky výroba hybridního typu vozidla a předpokládá se, že tento trend bude do budoucna pokračovat.

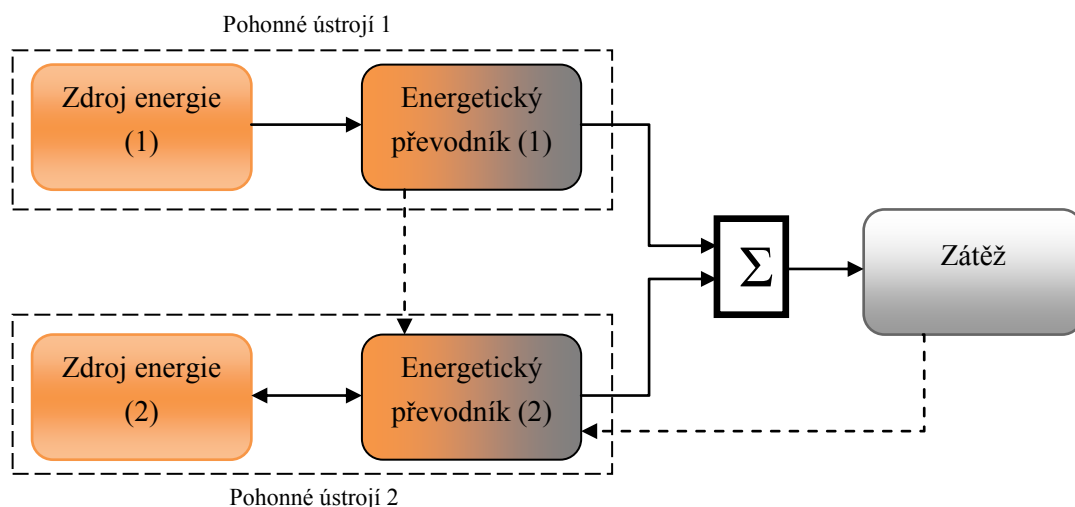
Cílem této diplomové práce je vytvořit simulační model elektrického děliče výkonu pro použití v hybridních vozidlech a analyzovat jeho chování v rámci energetické bilance.

1 Hybridní vozidla

Vzhledem k vysoké využitelnosti energie ropných paliv, poskytují konvenční vozidla se spalovacími motory dobrý výkon a životnost. Oproti hybridním a elektrickým pohonným jednotkám mají konvenční spalovací motory nevýhodu velké spotřeby a znečišťování životního prostředí. Hlavními důvody těchto nevýhod jsou nevhodná charakteristika spotřeby paliva motoru vzhledem k ztrátě kinetické energie při brzdění a malá účinnost hydraulického převodu v automobilech vybavených řídicím systémem stop&go. Elektromobily mají oproti konvenčním spalovacím motorům výhodu v efektivním zpracování energie a nulových emisích. Na druhou stranu ztrácejí na výkonu a ve srovnání s velkou energií paliva, kde je dojezd vozidla limitován pouze jeho množstvím, vydrží v tomto ohledu baterie mnohem kratší dobu. Hybridní vozidla snoubí spalovací motor a elektrický pohon a překonávají tak nevýhody obou samostatných pohonů.

1.1 Koncepční řešení pohonné jednotky hybridních vozidel

Každé hnací ústrojí automobilu by mělo poskytovat vysokou efektivitu pro vyvinutí dostatečného výkonu k pohybu vozidla a dodávce energie systémům ve vozidle, a to při nízkých emisích vypouštěných do ovzduší. Pohonné jednotky se můžou skládat z více kombinací pohonů (všeobecně z energetického zdroje a převodníku energie) jako jsou např.: benzinové a naftové motory, vodíkové nebo solární pohonné jednotky, čistě elektrické jednotky atd. Hybridní vozidla obsahují většinou jen dvě hnací ústrojí. Za účelem rekuperace brzděné energie, která se u klasických spalovacích motorů má ve formě tepelných ztrát, jsou většinou pohonné jednotky hybridních vozidel vybaveny převodníky, které umožňují zpětné vedení energie při brzdění. Na obr. 1.1 je vidět koncept hybridní pohonné jednotky a směry energetických toků, které se v tomto systému vyskytují.



Obr. 1.1- Blokové schéma pohonné jednotky hybridních vozidel

V rámci pohonného ústrojí hybridních vozidel existuje mnoho variací zpětné dodávky energie do zátěže. Z obr. 1.1 vyplývají tyto toky energií:

- 1) Pohonné ústrojí 1 dodává svou energii zátěži
- 2) Pohonné ústrojí 2 dodává svou energii zátěži
- 3) Pohonné ústrojí 1 a 2 dodávají svou energii zátěži současně
- 4) Pohonné ústrojí 2 získává zpětně energii ze zátěže (rekuperační brzdění)
- 5) Pohonné ústrojí 2 získává energii z pohonného ústrojí 1
- 6) Pohonné ústrojí 2 získává energii z pohonného ústrojí 1 a zátěže současně
- 7) Pohonné ústrojí 1 dodává svou energii zátěži a pohonnému ústrojí 2 současně
- 8) Pohonné ústrojí 1 dodává energii pohonnému ústrojí 2 a to pak dodává svou energii zátěži
- 9) Pohonné ústrojí 1 dodává energii zátěži a zátěž pak zpětně pohonnému ústrojí 2

Případ 1 ukazuje použití spalovacího motoru - pohonného ústrojí 1 (standardně dieselový nebo benzínový) a elektrického stroje – pohonného ústrojí 2 v rámci hybridního pohonu. Tento jízdní režim je využíván, když jsou baterie téměř vybité a spalovací motor nemá dostatek výkonu, aby baterie nabil, nebo v případě kdy jsou baterie plně nabity a výkon motoru se tak využívá k pohybu vozidla.

Případ 2 je čistě elektrický jízdní režim vozidla, u něž je spalovací motor úplně odpojen. V tomto módu pracuje pohonná jednotka v situacích, kdy se nedá efektivně využít spalovací motor (tj. při nízkých otáčkách, nebo při vysokých emisních požadavcích).

V případech, kdy je potřeba vysokých výkonů (při prudké akceleraci nebo jízdě do strmého kopce) je využíván hybridní jízdní režim 3.

V případě 4 - rekuperačním brzděním je kinetická nebo potenciální energie vozidla zpětně získávána elektrickým strojem, který slouží jako generátor. Získaná energie se uchovává v bateriích, kde může být využita později.

V případě 5, kdy je vozidlo v klidu (motor dobíhá, nebo v případě podřazování) a energie není dodávána ani získávána ze zátěže, jsou baterie nabíjeny spalovacím motorem.

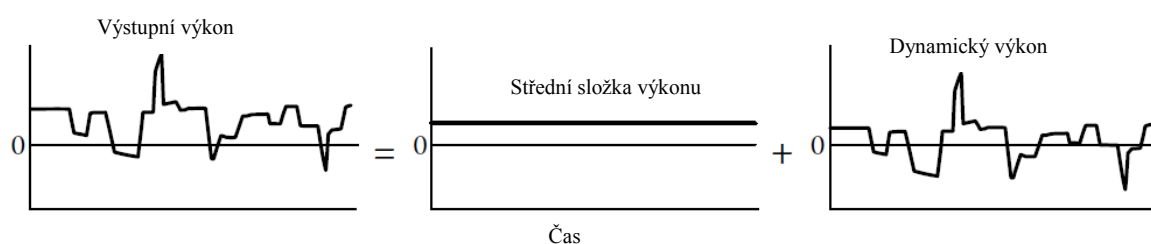
V případě 6 jsou nabíjeny baterie současně spalovacím motorem a rekuperačním brzděním prostřednictvím elektrického stroje.

V případě 7 je vozidlo poháněno spalovacím motorem, který navíc dobíjí baterie.

V případě 8 jsou baterie nabíjeny spalovacím motorem a zpětně potom dodávají energii zátěži.

V případě 9 je tok energie přenášen motorem, který využívá setrvačnost vozidla a dobíjí tak baterie. Typickým uspořádáním jsou dvě pohonná ústrojí přichycená na přední a zadní nápravě vozidla.

Ve srovnání s klasickým pohonným ústrojím vozidel vykazuje hybridní spojení rozmanité pracovní možnosti a tím zvětšuje efektivitu. Aplikací specifického režimu s použitím správné konfigurace a řízení při různých jízdních situacích může hybridní pohon potenciálně optimalizovat výkon, efektivitu a výrazně snížit emise. Výběr jízdního režimu závisí při reálných jízdních podmínkách na mnoha faktorech (např.: na fyzickém uspořádání pohonné jednotky, efektivních charakteristikách pohonu, zátěžových charakteristikách atd.). Volba jízdního režimu je esenciálním prvkem pro celkové zvýšení účinnosti vozidla. Obecně je spalovací motor nejefektivnějším pohonem v určité oblasti jeho zatížení. Avšak mimo tuto oblast je jeho efektivita velmi snížena a proto se vhodně doplňuje elektrickým motorem, který v těchto oblastech účinně vynahrazuje nedostatky spalovacího motoru.



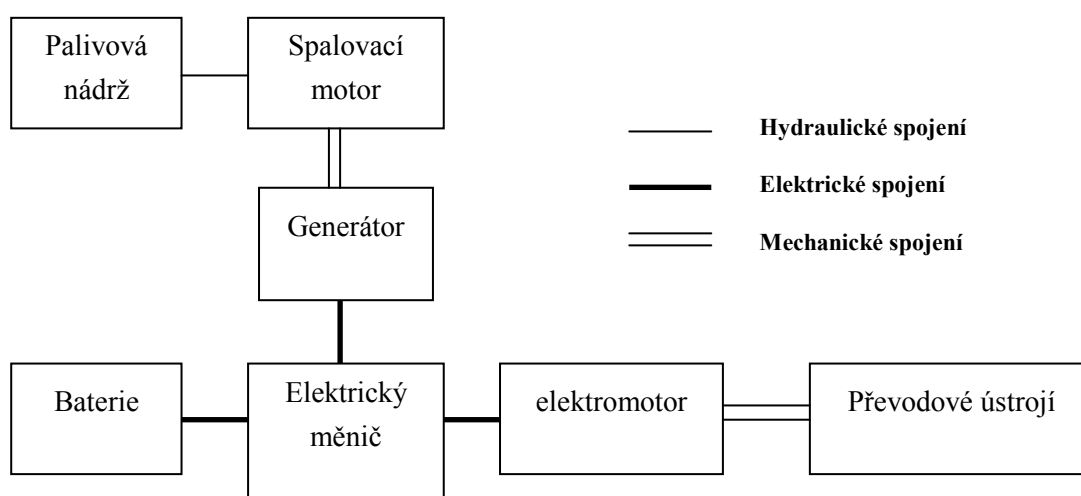
Obr. 1.2 – Užitečný výkon na výstupu rozdělený do statických a dynamických složek

Za reálných podmínek klesá užitečný výkon náhodně v závislosti, zda vozidlo akceleruje, deceleruje, a který rychlostní stupeň je zařazen (obr. 1.2). Užitečný výkon lze rozdělit do dvou složek, a to na složku střední (má konstantní hodnotu) a dynamickou, která má střední hodnotu nulovou. U návrhu řídicích strategií hybridních automobilů reprezentují spalovací motor a palivové články střední hodnotu výkonu a elektrický motor může nahrazovat dynamickou složku výkonu. Celková výstupní energie dynamické části bude v průběhu jízdy nulová. Mínilo se tím, že zdroj energie dynamické části pohonu bude mít stejnou kapacitu na začátku i konci jízdy, což znamená, že bude zastupovat funkci výkonového tlumiče. U hybridních vozidel může být střední výkon reprezentován spalovacím motorem, Stirlingovým motorem, palivovými články atd. Spalovací motor a palivové články mohou být v tomto případě mnohem menší než u konvenčních vozidel poháněných pouze jedním typem pohonu, jelikož dynamický výkon je brán ze zdroje energie dynamicky a poté je použit nejefektivněji v situacích, kdy je ho zapotřebí. Dynamický výkon může být reprezentován elektrickým motorem napájeným bateriemi, ultrakapacitami, setrvačnickým pohonem (mechanické baterie) a jejich kombinací.

1.2 Architektury hybridních pohonů

Architektura hybridního vozidla je volně definována jako spojení mezi komponenty, které definují toky energie a řídicí kanály. Do roku 2000 byla hybridní vozidla rozdělena do dvou skupin, a to na sériové a paralelní. Od roku 2000 se krom sériových a paralelních hybridních vozidel mluví také o sériově-paralelních a komplexních hybridech (viz obr. 1.3-1.5). [3]

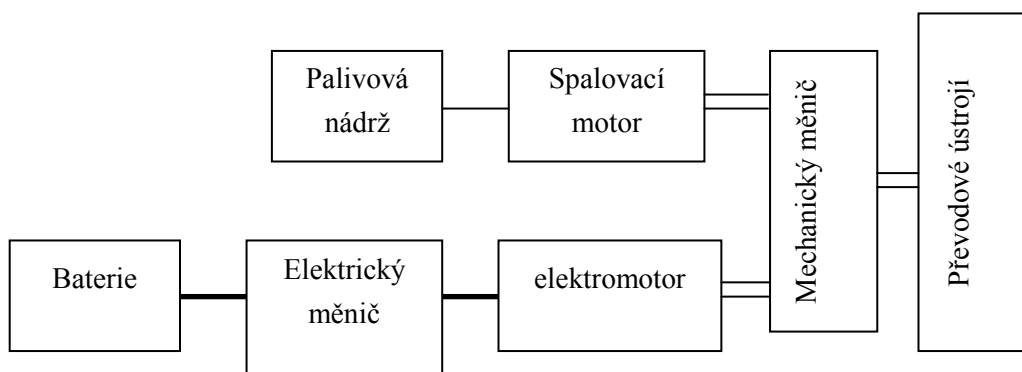
U hnacích ústrojí hybridních vozidel se vyskytují dva druhy energií: mechanická a elektrická. Podle těchto energií lze hybridní vozidla dělit dle elektrických, mechanických a elektromechanických vazeb v hnacím ústrojí.



Obr. 1.3 – Blokové schéma sériového hybridního pohonu

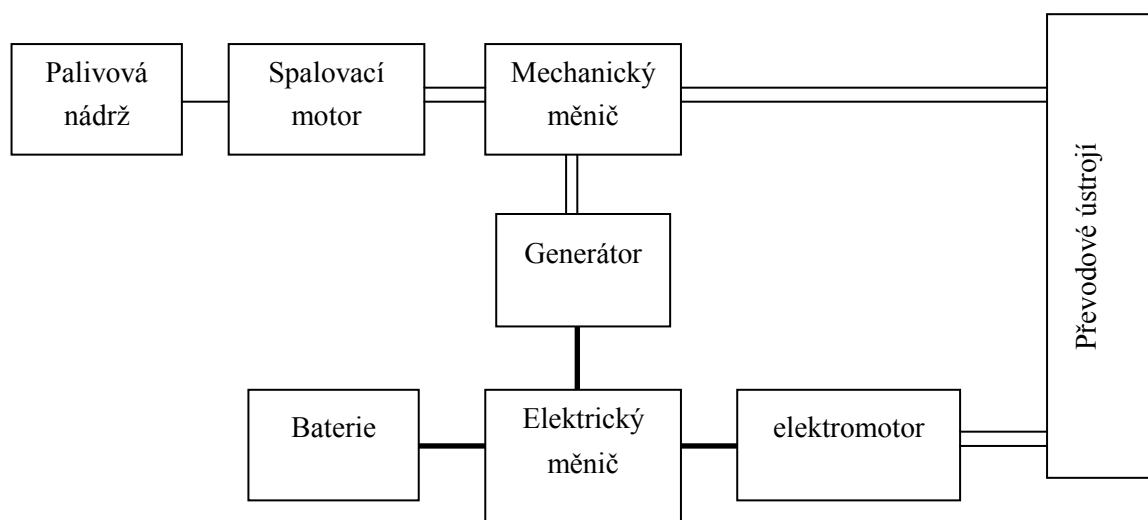
Na obr. 1.3 je zobrazena bloková architektura klasického sériového hybridního hnacího ústrojí. Klíčovým prvkem této architektury je elektrický měnič, který zpracovává energii mezi bateriemi, generátorem a elektromotorem (princip obousměrného toku energie baterie, generátor - elektromotor). Spalovací motor s generátorem jsou hlavními dodavateli energie bateriím, které slouží jako výkonový tlumič během dynamických jízd.

Na obr. 1.4 je zobrazena bloková architektura klasického paralelního hybridního hnacího ústrojí. Klíčovým prvkem v této architektuře je mechanický měnič, který zpracovává paralelně dva toky energií. Spalovací motor je zde hlavním zdrojem energie a baterie v kombinaci s elektrickým motorem tvoří výkonový tlumič. Energetické toky mohou být v tomto případě ovlivňovány jen dvěma zdroji, a to spalovacím motorem a elektromotorem.



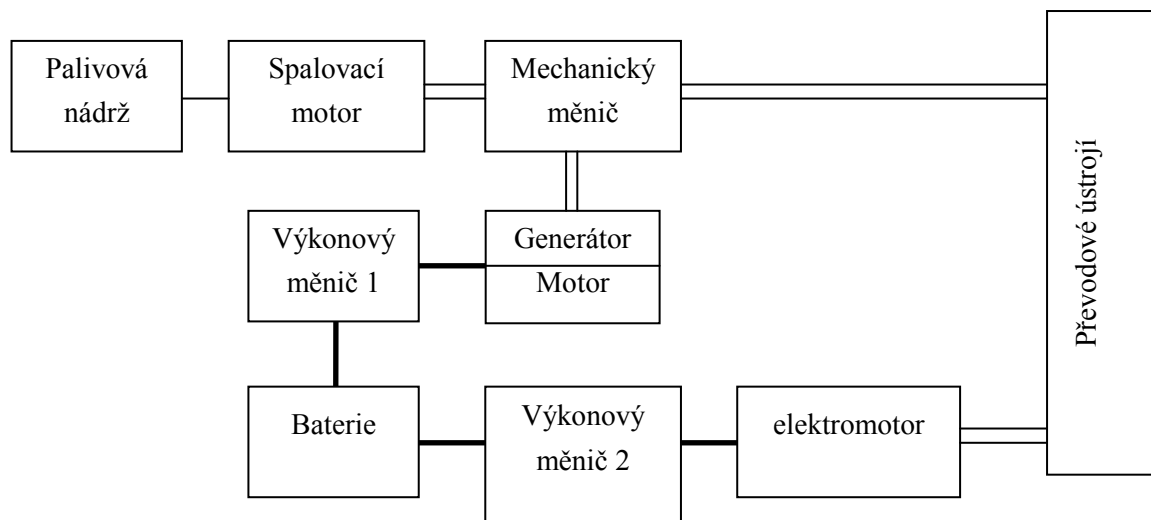
Obr. 1.4 – Blokové schéma paralelního hybridního pohonu

Na obr. 1.5 je zobrazena bloková architektura klasického sériově-paralelního hybridního hnacího ústrojí. Klíčem v této architektuře je použití mechanického a elektrického měniče. Tato architektura je spojením sériové a paralelní architektury tak, že disponuje širší škálou operačních režimů hybridního pohonu, než je tomu u obou samotných architektur. Nevýhodou sériově-paralelní architektury je relativně složitá konstrukce a vyšší cenová relace.



Obr. 1.5 – Blokové schéma sériově-paralelního hybridního pohonu

Na obr. 1.6 je zobrazena blokově architektura komplexního hybridního hnacího ústrojí, která je podobná architektuře sériově-paralelní. Jediným rozdílem je zrušení elektrické vazby mezi motor-generátorem a výkonovým měničem 2 a přidání výkonového měniče 1 mezi motor-generátor a baterie.



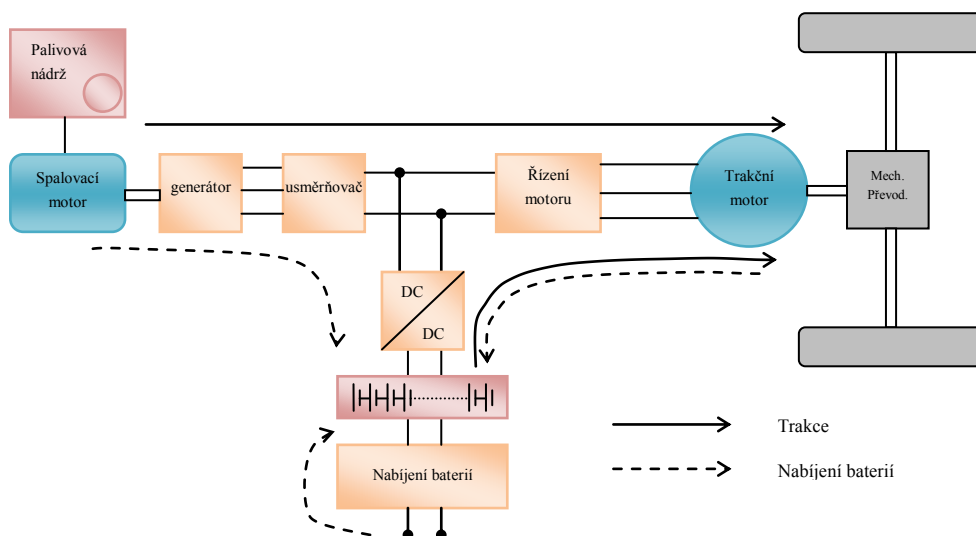
Obr. 1.6 – Blokové schéma komplexního hybridního pohonu

1.2.1 Sériový hybridní pohon

U sériového hybridního hnacího ústrojí existují dva zdroje energie, které poskytují svou energii elektrickému motoru, jenž pohání vozidlo. Nejčastější provedení sériového hybridního pohonu je zobrazeno na obr. 1.7. Za nepřímý zdroj energie se zde považuje palivová nádrž. Dalším nepřímým prvkem je spalovací motor spojený s elektrickým generátorem. Výstup generátoru je propojen sériovou sběrnicí s řídicím elektrickým měničem. S touto sběrnicí je také spojen obousměrný zdroj energie, tj. spojení baterií pomocí řízeného obousměrného výkonového měniče (DC/DC měnič). Ke sběrnici je také připojen regulátor elektrického motoru. Trakční motor může být řízený buď motorem, nebo generátorem v obou směrech otáčení. Dobíjení baterie může být realizováno také zapojením do sítě. Sériový hybridní pohon pochází z hybridních vozidel, u kterých je připojován motor-generátor proto, aby prodloužil dojezd vozidla, který je limitován krátkou životností baterií. Pro řízení pohonného ústrojí slouží řídicí zařízení vozidla, které řídí toky energie dle parametrů zadaných řidičem pomocí akceleračního a brzdového pedálu a dalších zpětnovazebních členů. Toto zařízení řídí jmenovitě spalovací motor, elektrický měnič (řízený usměrňovač, DC/DC konvertor) a trakční motor. Ve vybraných operačních režimech se řízením těchto prvků dosahuje požadovaného krouticího momentu nebo rekuperačního brzdění.

Operační režimy pro optimalizaci požadovaných hodnot sériového hybridního pohonu:

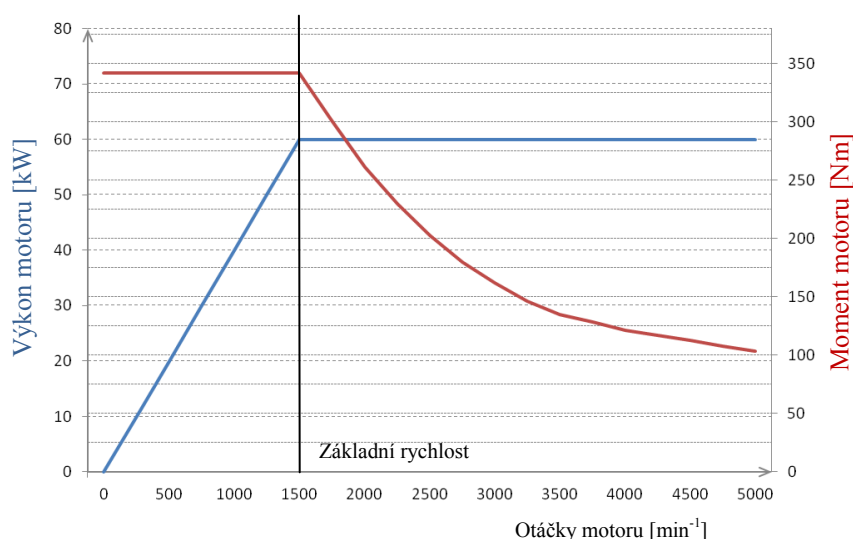
- 1) Čistě elektrický jízdní režim – motor je vypnut a vozidlo je poháněno jen z baterií.
- 2) Čistě motorový jízdní režim – výkon pro pohon vozidla obstarává motor/generátor, zatímco baterie nepracují s energií k pohonu vozidla. Elektrický stroj slouží jako elektrický převod mezi motorem a řízenými koly.
- 3) Hybridní jízdní režim – výkon pro pohon vozidla je brán z motor/generátoru a současně z baterií. Energie z obou prvků je sloučena elektrickou spojkou.
- 4) Motorový pohon s nabíjením baterií – motor/generátor nabíjí baterie a současně pohání vozidlo. Jeho energie se rozděluje v elektrické spojce.
- 5) Režim rekuperačního brzdění – motor/generátor je vypnut a trakční motor pracuje jako generátor poháněný kinetickou nebo potenciální energií vozidla. Generovaná energie nabíjí baterie.
- 6) Režim nabíjení baterií – trakční motor nepracuje s žádnou energií a motor/generátor pracuje pouze, aby nabíjel baterie.
- 7) Režim hybridního nabíjení baterií – v průběhu brzdění složí motor/generátor a trakční motor jako generátory pro nabíjení baterií.



Obr. 1.7 – Struktura sériového hybridního pohonu

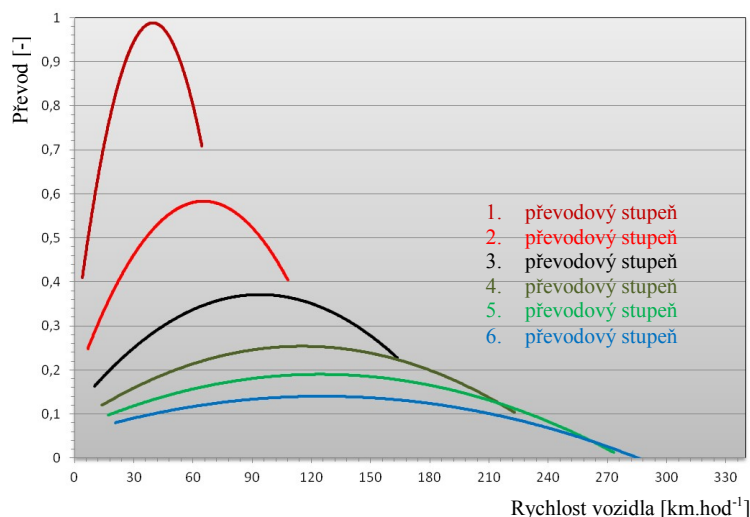
Výhody sériového hybridního pohonu:

1. Mezi motorem a řízenými koly neexistuje žádné mechanické spojení. Motor může využívat celou jeho momentovou i rychlostní charakteristiku. S vysoce náročným řízením výkonu poskytuje tato nesmírná výhoda možnost motoru pracovat ve všech oblastech s maximální efektivitou. V určitém úzkém pásmu mohou být efektivně sníženy emise pomocí speciálních konstrukcí a řídicích technologií. Absence mechanické vazby mezi motorem a řízenými koly umožňuje použití vysokootáčkových motorů, u kterých je spojení s hnací nápravou mechanicky složité (např.: turbíny, Stirlingův motor nebo všeobecně motory s převodovkou s pomalými dynamickými odezvami).
2. Protože se rychlostní a momentová charakteristika elektromotoru blíží ideálním charakteristikám pohonu (příklady uvedeny na obr. 1.8 a 1.9), není nutné, aby mělo pohonné ústrojí implementováno převodovku. Proto může být struktura pohonného ústrojí velmi zjednodušená, a to sníží i její celkovou cenu. Navíc můžou být dva motory použity k samostatnému pohonu kola, a tudíž lze vyloučit i mechanický diferenciál. Takovéto uspořádání má výhodu v rozdělení rychlostí otáčení kol, jako je tomu u mechanického diferenciálu a navíc zastává funkci protiskluzovou, která se vyskytuje u konvenčního řízení trakce. Vyskytuje se zde i pohon všech čtyř kol, kdy může být nezávisle u každého kola řízena jeho rychlost a moment. To má za následek výrazné zlepšení říditelnosti a ovladatelnosti vozidla. Velmi důležité je to zejména u off-road vozidel, které se pohybují v nehostinných terénech.



Obr. 1.8 – Příklad závislosti momentu a výkonu na otáčkách elektrického motoru

3. Řízení pohonného ústrojí u sériového hybridního vozidla je jednodušší, ve srovnání s ostatními provedeními, kvůli jeho plně mechanickému oddělení mezi motorem a koly.



Obr. 1.9 – Příklad rychlostní charakteristiky spalovacího motoru

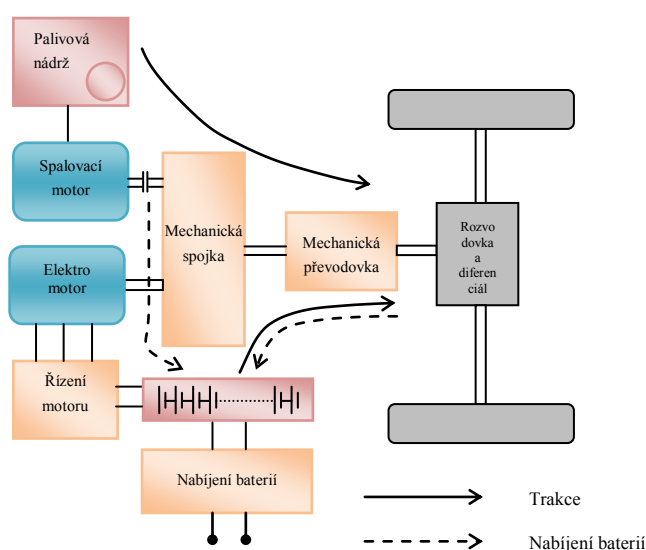
Nevýhody sériových hybridních pohonů:

- 1) Energie z motoru mění svou formu k hnaným kolům hned dvakrát (mechanickou energii na elektrickou v generátoru a nazpět v trakčním motoru). Navíc energetické ztráty jsou závislé na efektivitě generátoru a trakčního motoru.
- 2) Generátor zvyšuje hmotnost pohonu a jeho cenu.
- 3) Jelikož je trakční motor jediným zdrojem energie pohánějícím vozidlo, musí být dostatečně dimenzován, aby poskytoval optimální výkon a zrychlení (nevylíká se situace při stoupání).

1.2.2 Paralelní hybridní pohon s mechanickou spojkou

U paralelního hybridního pohonu je mechanický výkon motoru spojen přímou cestou k hnané nápravě podobně, jako je tomu u vozidel s konvenčními spalovacími motory. Mechanická vazba mezi motorem a elektromotorem spojuje výkony obou dvou a vytváří tak jedinečný rys architektury paralelního hybridního pohonu. Operační režimy má tento pohon shodné s režimy pro sériový hybridní pohon. Hlavní výhodou oproti sériovému hybridnímu pohonu je přímé poskytování točivého momentu oběma motory kolům beze ztrát v převodovém ústrojí. Další výhodou je kompaktnost celého pohonného ústrojí, jelikož se zde nevyskytuje generátor a trakční

motor je menší než u sériového hybridního pohonu. Velkou nevýhodou je však mechanická vazba mezi motorem a hnacími koly, jelikož se pracovní bod motoru dynamicky mění v úzkém rozmezí rychlostní a momentové charakteristiky. Nepatrnou nevýhodou je komplexní struktura a řízení celého pohonného ústrojí. V podstatě se mechanická vazba skládá z vazby momentové a otáčkové. Ve vazbě momentové se jedná o spojení dvou momentů motoru a elektromotoru (oba dva prvky mohou být nezávisle na sobě řízeny), a tento moment je pak přiveden na hnací kola. Rychlost otáčení motoru, elektromotoru a rychlost vozidla tvoří statickou vazbu a nemůžou být nezávisle řízeny z důvodu zachování energie. Stejně tomu je u otáčkové vazby, kdy jsou mezi sebou momenty motoru a elektromotoru propojeny a nemohou být řízeny samostatně.



Obr. 1.10 – Paralelní hybridní pohon s mechanickou vazbou

1.2.3 Paralelní hybridní pohon s momentovou vazbou

Na obr. 1.11 je zobrazeno koncepční řešení mechanické momentové spojky. Jedná se o zařízení s třemi porty a dvěma stupni volnosti. Port 1 je jednosměrný vstupní port a porty 2 a 3 jsou obousměrnými vstupně – výstupními porty (výstupy a vstupy nemohou být ve stejnou dobu aktivní) tohoto zařízení. V aplikacích s hybridními vozidly je port 1 přímo připojen prostřednictvím mechanického převodu. Port 2 se připojuje, buď přímo, nebo pomocí mechanického převodu na hřídel elektromotoru. Port 3 je mechanicky napojený na hnací kola. Jestliže se zanedbají ztráty, tak je za ustáleného stavu výkon přivedený na momentovou spojku roven výkonu na jejím výstupu. Port 2 je vstupní port pro pohon vozidla (elektromotor) a výkon na kolech vozidla se dá vyjádřit rovnicí:

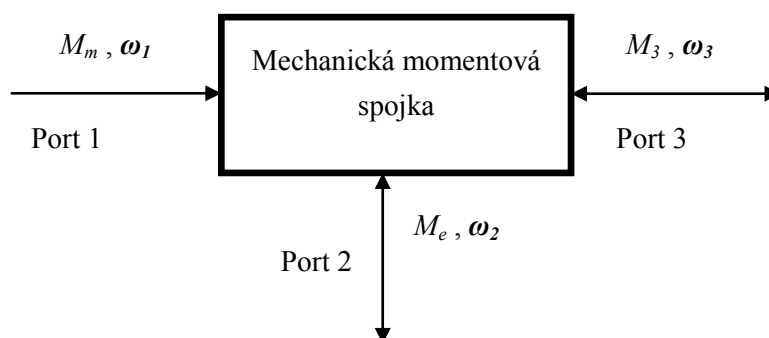
$$M_3 \cdot \omega_3 = M_m \cdot \omega_1 + M_e \cdot \omega_2. \quad (1.1)$$

Momentová spojka je vyjádřena vztahem:

$$M_3 = k_1 \cdot M_m + k_2 \cdot M_e, \quad (1.2)$$

kde k_1 a k_2 jsou strukturálními parametry momentové spojky a dají se vyjádřit jako převodové poměry (většinou mají konstantní hodnotu). Moment zátěže M_3 a momenty M_1 a M_2 mohou být řízeny samostatně a zastávají funkci pohonných momentů. Dle rovnice 1.1 jsou na sobě úhlové rychlosti ω_1 , ω_2 a ω_3 závislé a nemohou být proto nezávisle řízeny. Vztah 1.1 můžeme vyjádřit podobně rovnicí:

$$\omega_3 = \frac{\omega_1}{k_1} = \frac{\omega_2}{k_2}. \quad (1.3)$$

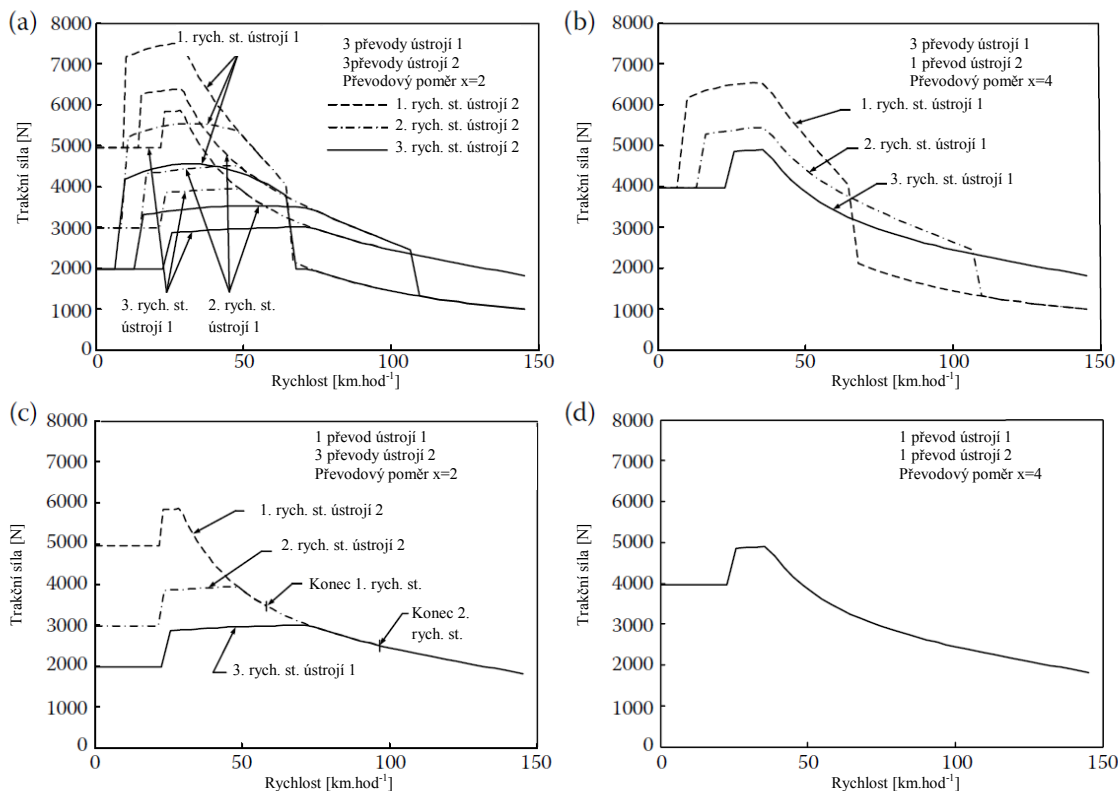


Obr. 1.11 – Blokové schéma mechanické momentové spojky

1.2.4 Jednotlivá provedení pohonných jednotek s momentovou spojkou

Momentové spojky mohou tvořit různé druhy a kombinace s hybridními pohonnými ústrojími. Dle počtu použitých momentových spojek může být vytvořena buď sestava s jednou hřídelí, nebo se dvěma. V těchto sestavách jsou převodová ústrojí na různých místech s různými převody, což má za následek tvorbu různorodých hnacích charakteristik. Kvalitní provedení sestavy závisí většinou na jízdních podmínkách, velikosti motorů a na tvaru jejich momentových charakteristik. Na obr. 1.13 lze vidět provedení hybridní jednotky s dvěma hřídeli. Jedna hřídel je umístěna mezi spalovací motor a momentovou spojkou a druhá mezi elektromotor a momentovou spojkou. Obě převodová ústrojí mohou mít samostatně více převodů. Na obr. 1.12 jsou zobrazeny hlavní trakční charakteristiky vozidel s různými převodovými rychlostmi. Celková účinnost a výkon pohonného ústrojí s dvěma hřídeli je vyšší než u ostatních provedení, jelikož poskytuje možnost spalovacímu motoru a elektrickému ústrojí pracovat v optimálních oblastech jejich použití. Navíc tato

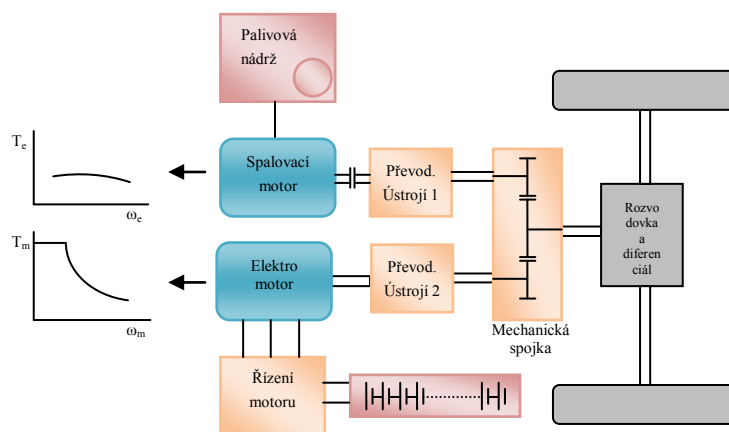
konstrukce poskytuje velkou flexibilitu tvaru charakteristik spalovacího motoru a elektromotoru. Avšak dvě převodová ústrojí obsahující mnoho převodů značně komplikují pohonné ústrojí a zvyšují složitost řídicího systému a výběru správného rychlostního stupně v obou ústrojích.



Obr. 1.12 – Trakční charakteristiky jednotlivých převodových ústrojí [2]

Trakční charakteristika na obr. 1.12b je platná pro konfiguraci hybridního pohonu s dvěma hřídeli (viz obr. 1.13, převodové ústrojí 1 obsahuje více převodů a převodové ústrojí 2 jen jeden převod). V hybridních pohonech může být toto uspořádání dostačující pro pohyb po nakloněné rovině (velikost trakční síly limituje adheze pneumatik). Převod 2 zajišťuje velký točivý moment elektrického stroje v nízkých otáčkách.

Převodové ústrojí 1 kompenzuje nevýhody momentových charakteristik spalovacího motoru (plochý průběh momentu v celém rozsahu otáček) a zvyšuje efektivitu s tím, že snižuje rozsah otáček, kdy musí být vozidlo poháněno pouze elektricky a předchází tak rapidnímu vybíjení baterií.



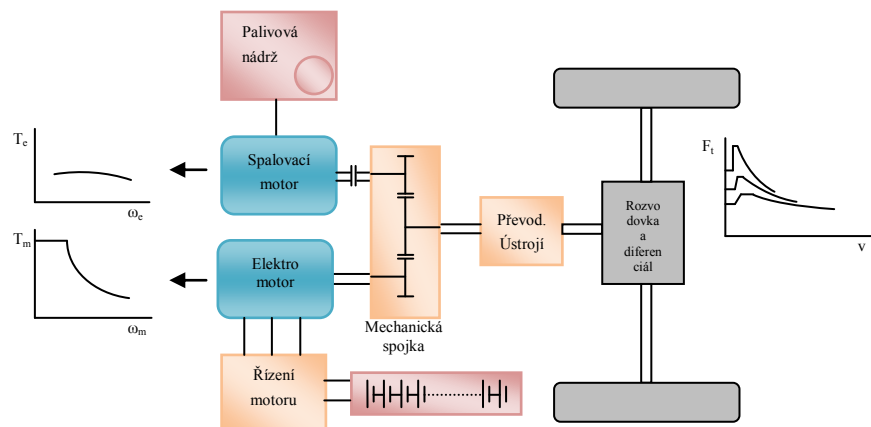
Obr. 1.13 – Provedení pohonné jednotky s dvěma hřídeli

Naopak na obr. 1.12c jsou zobrazeny trakční křivky pohonného ústrojí s jedním převodem pro spalovací motor a více převody pro motor elektrický. Tato konfigurace se nepoužívá, jelikož u ní nelze využít výhod dvou zdrojů energie pro pohon vozidla.

Na obr. 1.12d jsou zachyceny trakční křivky pohonného ústrojí s dvěma převodovými ústrojími s jedním převodem. Výhoda tohoto uspořádání je v jednoduchém provedení a jeho řízení. Omezením tohoto hnacího ústrojí je maximální trakční síla.

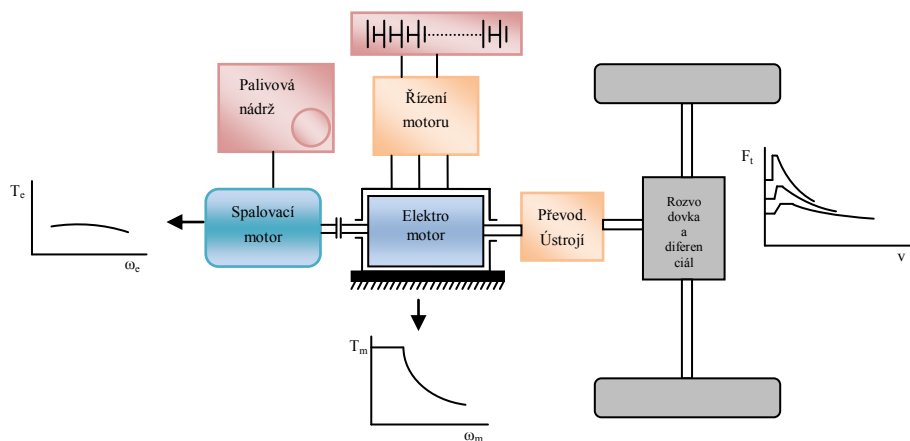
Další konfigurace pohonného ústrojí s dvěma hřídeli je zobrazena na obr. 1.14. Převodové ústrojí je zde implementováno mezi momentovou spojku a hnací hřídel a pracuje tak s momenty spalovacího motoru a motoru elektrického ve stejném poměru. Rozvržení hnacího převodu k_1 a k_2 momentové spojky dovoluje elektrickému a spalovacímu motoru dosáhnout nejvyšších otáček ve stejnou dobu.

Toto provedení lze použít pro relativně malý spalovací a elektrický motor, u kterých je zapotřebí vícestupňového převodového ústrojí pro zvýšení efektivity v nízkých otáčkách.



Obr. 1.14 – Provedení pohonné jednotky s dvěma hřídeli (jedno převodové ústrojí)

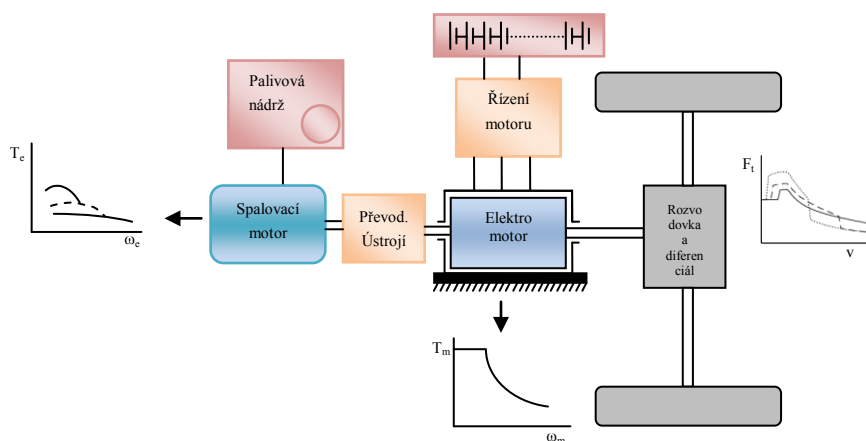
Nejjednodušší a nejkompaktnější architekturou hybridního pohonu s momentovou vazbou je pohonné ústrojí s jednou hřídelí, kde slouží rotor elektrického motoru jako dělič momentu ($k_1 = 1$ a $k_2 = 1$ pro rovnice 1.2 a 1.3). Elektrický motor může být umístěn buď mezi spalovacím motorem a převodovým ústrojím (viz obr. 1.15), nebo mezi převodovým ústrojím a rozvodkou (viz obr. 1.16).



Obr. 1.15 – Provedení paralelní hybridní pohonné jednotky s jednou hřídelí

V provedení na obr. 1.15 jsou točivé momenty obou motorů upravovány převodovým ústrojím. Také vzniká požadavek na stejné otáčky obou strojů, a proto se používá v případech, kde se vyskytují v hybridních vozidlech menší elektromotory plnící funkci startéru spalovacího motoru, generátoru, posilovače výkonu a rekuperačního členu energie v rámci brzdění.

V provedení na obr. 1.16 je točivý moment upravován převodovým ústrojím pouze u spalovacího motoru a elektromotor dodává svůj točivý moment bez jakýchkoli úprav rozvodovce. Tato konfigurace se používá v pohonech s velkým elektromotorem s širokým rozsahem konstantního výkonu. Převodové ústrojí pouze mění optimální pracovní bod spalovacího motoru a zlepšuje tak jeho účinnost a výkon vozidla. Jelikož je spalovací motor připojen na kola přímo, nemůžou být baterie nabíjeny (když vozidlo stojí) elektromotorem v režimu generátoru.

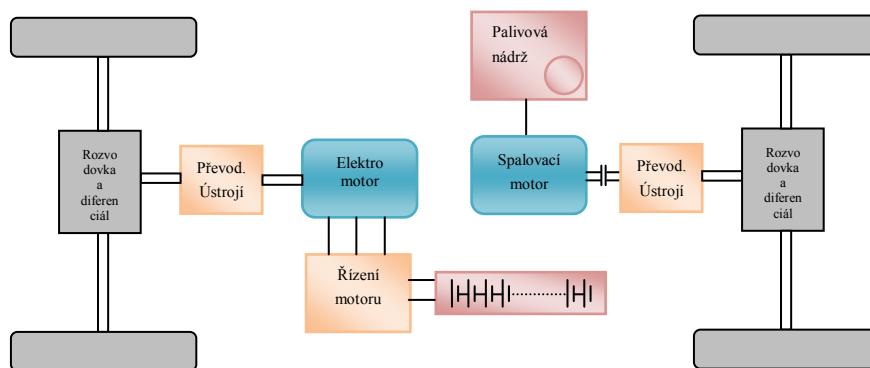


Obr. 1.16 – Provedení paralelní hybridní pohonné jednotky s jednou hřídelí

Další provedení paralelní hybridní jednotky je realizováno rozdělením jedné hřídele na dvě samostatné, z nichž je jedna hřídel poháněna spalovacím motorem a druhá elektromotorem (viz obr. 1.17). Princip funkce provedení se separovanými hřídeli je shodný s trakčními charakteristikami paralelního hybridního pohonu (stejně jako je tomu na obr. 1.13). Oddělením hřídelí získává tato architektura určité výhody oproti konvenčním řešením vozidla. Mezi tyto výhody patří pohon všech kol, jenž napomáhá ke stabilitě vozu na silnici a zmenšuje nároky na trakční sílu samostatných kol. Nemění se přitom převodové ústrojí ani spalovací motor a na další nápravu je přitom připojen jako pohon elektromotor.

Avšak nevýhodou může být složitý a větší diferenciální systém, který může omezit prostor pro cestující a zavazadla. Určité řešení se skrývá ve zjednodušení převodového ústrojí za elektromotorem na jediný převod a rozdělení elektromotoru na dva, z nichž by každý poháněl samostatně jedno kolo vozidla.

Platí zde pravidlo, že baterie nejsou nabíjeny, když je vozidlo v klidu.

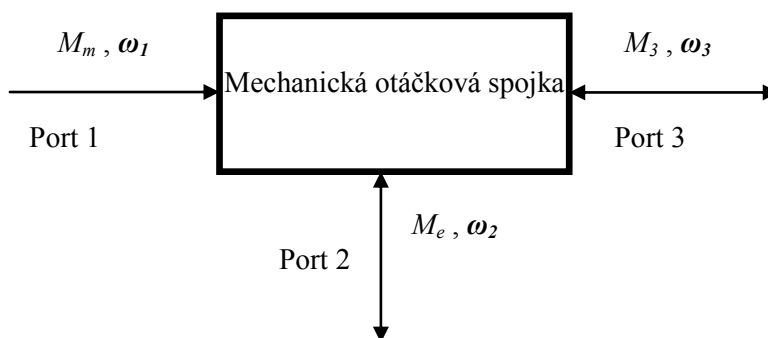


Obr. 1.17 – Provedení paralelní hybridní pohonné jednotky s oddělenými hřídeli

1.2.5 Paralelní hybridní pohon s otáčkovou spojkou

1.2.5.1 Zařízení s otáčkovou spojkou

Na obr. 1.18 je zobrazena otáčková spojka, která spojuje otáčky dvou zdrojů energie. Stejně jako u momentové spojky se jedná o mechanické zařízení s třemi porty a dvěma stupni volnosti. Port 1 je jednosměrným vstupem energií spalovacího motoru. Porty 2 a 3 jsou spojeny s elektrickým motorem a zátěží (oba dva jsou obousměrnými rozhraními energetického toku).



Obr. 1.18 – Blokové schéma mechanické otáčkové spojky

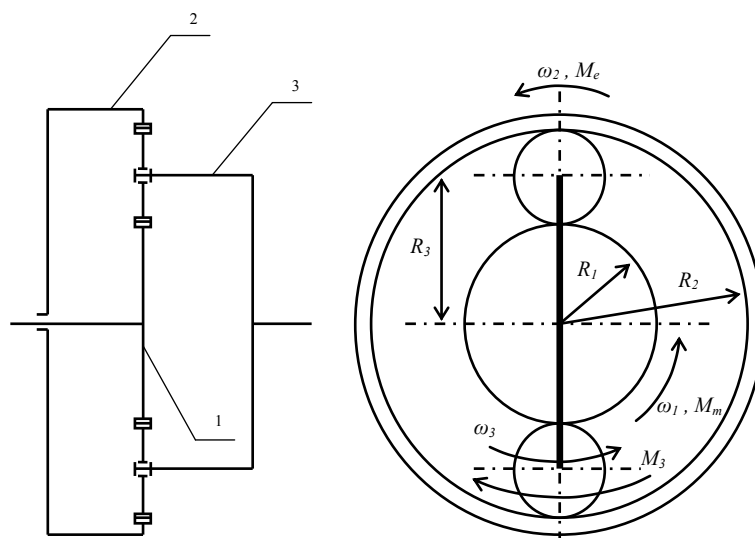
Mechanická otáčková spojka je vyjádřena vztahem:

$$\omega_3 = k_1 \cdot \omega_1 + k_2 \cdot \omega_2. \quad (1.4)$$

kde k_1 a k_2 jsou strukturálními a geometrickými parametry otáčkové spojky. Úhlové rychlosti jsou ω_1 , ω_2 a ω_3 , a dvě z nich mohou být řízeny samostatně. Pokud vezmeme v úvahu zákon zachování energie, dají se momenty vyjádřit vztahem:

$$M_3 = \frac{M_m}{k_1} + \frac{M_e}{k_2}, \quad (1.5)$$

Ve kterém určuje jeden z nich minimální točivý moment ostatních dvou.



Obr. 1.19 – Planetový převod (princip otáčkové spojky)

Typickým zařízením využívajícím princip otáčkové spojky je planetový převod (viz obr. 1.19). Planetový převod se skládá z centrálního kola, korunového kola a kotvy (označené 1-3). Vztahy mezi jednotlivými otáčkami komponentů planetového převodu lze získat pevným spojením kotvy s rámem (tj. $\omega_3 = 0$), kdy se získá vztah pro převodový poměr mezi centrálním a korunovým kolem:

$$i_{1-2}^3 = \frac{\omega_2^3}{\omega_1^3} = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{Z_2}{Z_1}, \quad (1.6)$$

kde ω_1^3 a ω_2^3 jsou úhlovými rychlostmi centrálního a korunového kola, vztažené ke kotvě (která je v klidu). R_1 a R_2 jsou poloměry centrálního a korunového kola a Z_1 a Z_2 jsou počty jejich zubů, které jsou přímo-úměrné polůměrům. Kladný směr úhlové rychlosti je na obrázku naznačen šipkou

(záporný ve směru hodinových ručiček). Z rovnice 1.6 vyplývá, že směry úhlových rychlostí jsou opačné a proto je jejich poměr záporný.

Pokud by nebyla kotva pevně přichycena k rámu, absolutní úhlové rychlosti by byly definovány takto:

$$\frac{\omega_1 - \omega_3}{\omega_2 - \omega_3} = i_{1-2}^3. \quad (1.7)$$

Poté dostaneme rovnici:

$$\omega_1 - i_{1-2}^3 \cdot \omega_2 - (1 - i_{1-2}^3) \cdot \omega_3 = 0. \quad (1.8)$$

Pokud zvolíme převodový poměr kladný, dostaneme vztah:

$$i_g = -i_{1-2}^3 = \frac{R_2}{R_1} = \frac{Z_2}{Z_1}, \quad (1.9)$$

a celková rovnice může být přepsána jako:

$$\omega_1 + i_g \cdot \omega_2 - (1 + i_g) \cdot \omega_3 = 0. \quad (1.10)$$

$$\omega_3 = \frac{1}{1 + i_g} \cdot \omega_1 + \frac{i_g}{1 + i_g} \cdot \omega_2. \quad (1.11)$$

Pokud porovnáme rovnice 1.11 a 1.4, dostaneme vztah pro strukturální parametry otáčkové spojky:

$$k_1 = \frac{1}{1 + i_g}, \quad k_2 = \frac{i_g}{1 + i_g}. \quad (1.12)$$

Stejně jako je tomu u definice otáček. Točivý moment působící na tělesa planetového převodu je definován kladně ve směru proti hodinovým ručičkám a záporně naopak. Celkový výkon jednotky se zanedbáním vnitřních ztrát je poté nulový a můžeme ho vyjádřit rovnicí:

$$M_m \cdot \omega_1 + M_e \cdot \omega_2 + M_3 \cdot \omega_3 = 0. \quad (1.13)$$

Spojením rovnic 1.11 a 1.13 získáme vztah:

$$M_3 = -(1 + i_g) \cdot M_m = -\frac{1 + i_g}{i_g} \cdot M_e. \quad (1.14)$$

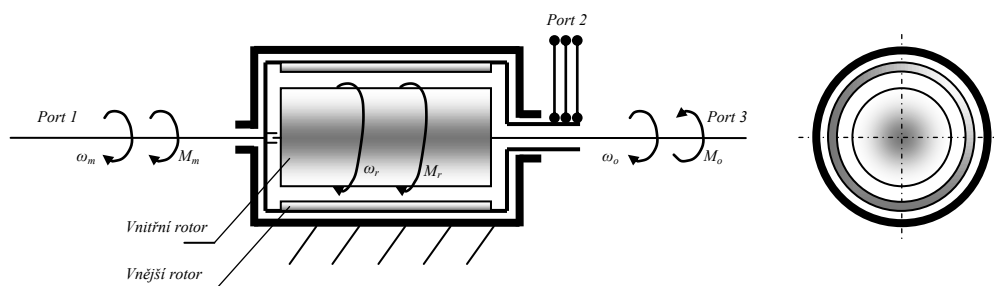
Rovnice 1.14 naznačuje, že momenty M_m působící na centrálním kole a M_e působící na korunovém kole mají stejná znaménka (buď kladné, nebo záporné), a že moment působící na kotvě M_3 má vždy k těmto momentům obrácené znaménko (viz obr. 1.19). Pokud je jeden z elementů (centrální kolo, korunové kolo a kotva) uchycen na rámu, planetový převod se stane jedním převodem, jelikož bude jeden stupeň volnosti vázaný (jeden vstup a jeden výstup).

Vztahy mezi otáčkami a momenty v okamžicích uchycení daného elementu planetového převodu jsou zobrazeny v tab. 1.1.

Uchycený element	Otáčky	Moment
Centrální kolo	$\omega_3 = \frac{i_g}{1 + i_g} \cdot \omega_2$	$M_3 = -\frac{1 + i_g}{i_g} \cdot M_e$
Korunové kolo	$\omega_3 = \frac{1}{1 + i_g} \cdot \omega_1$	$M_3 = -(1 + i_g) \cdot M_m$
Kotva	$\omega_3 = -i_g \cdot \omega_2$	$M_3 = \frac{1}{i_g} \cdot M_e$

Tab. 1.1 – Vztahy mezi otáčkami a momentem při uchycení jednoho z elementů

Další zařízení pracující na principu otáčkové spojky je elektrický motor s plovoucím statorem. Stator, který je ve většině standardních motorů uchycen na stacionární rám, je zde rozpojen a tvoří zařízení s dvojitým rotorem (vnitřní a vnější rotor). Vnitřní a vnější rotor, společně se vzduchovou mezerou tvoří tři porty tohoto zařízení. Pomocí vzduchové mezery je přeměňována energie elektrická na energii mechanickou (viz obr. 1.20).



Obr. 1.20 – Motor s dvěma rotory

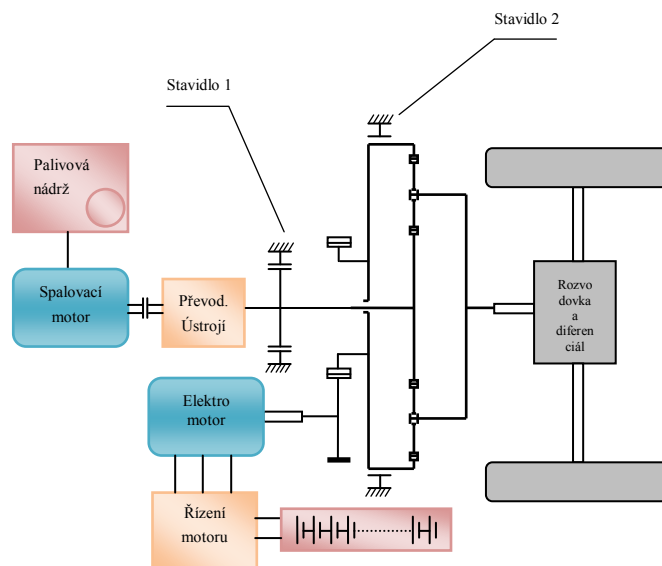
Otáčky motoru, označované ω_{or} , jsou relativními otáčkami vnitřního rotoru, které zohledňují otáčky vnějšího rotoru. Pokud vezmeme v úvahu princip akce a reakce, platí zde, že oba točivé momenty působící na oba rotory jsou stejné a určují tak hodnoty konstant $k_1 = k_2 = 1$. Vztah mezi jejich otáčkami je následující:

$$\omega_o = \omega_m + \omega_r, \quad (1.15)$$

kde ω_r jsou otáčky vnitřního rotoru vztažené k otáčkám vnějšího rotoru.

Vztah mezi točivými momenty je vyjádřen rovností:

$$M_m = M_o = M_r. \quad (1.16)$$



Obr. 1.21 – Hybridní elektrický pohon s planetovým převodem jako otáčkovou spojkou

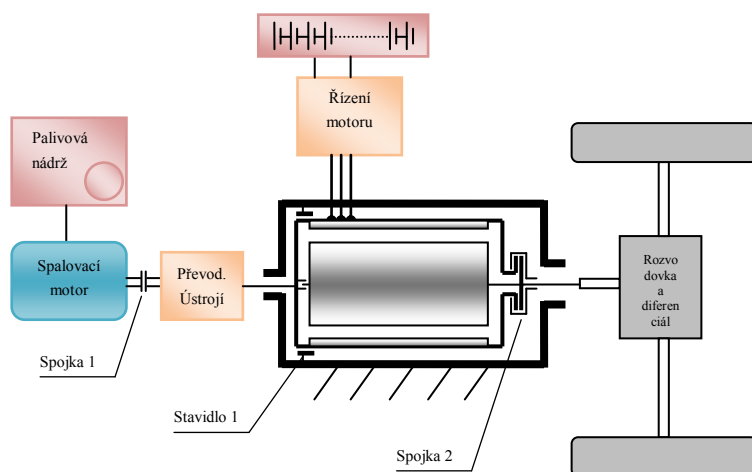
1.2.5.2 Provedení pohonných jednotek s otáčkovou spojkou

Stejně jako je tomu u zařízení s momentovou spojkou, můžou být i jednotky s otáčkovými spojkami použity pro konstrukci různých hybridních pohonů. Na obr. 1.21 pohání spalovací motor prostřednictvím spojky a převodu planetový převod, který pak slouží pro úpravu točivého momentu tak, aby vyhovoval požadavkům jízdního režimu. Dle tvaru momentových charakteristik spalovacího motoru může mít převod buď více převodů, nebo jenom jeden. Elektrický motor pohání prostřednictvím dvojice převodů korunové kolo. Stavidla 1 a 2 uzamykají centrální a

korunové kolo (připnutí k rámu vozidla) tak, aby se využívalo různých operačních režimů. Mezi tyto režimy patří:

Hybridní pohon – je operační režim, kdy jsou stavidla 1 a 2 rozpojena (centrální a korunové kolo se mohou točit) a spalovací motor s elektrickým strojem pohání kladným točivým momentem řízená kola. Výstupní otáčky a točivý moment kotvy jsou popsány rovnicemi 1.11 a 1.14. Otáčky kotvy jsou v těchto rovnicích popsány jako součet otáček centrálního kola (otáčky spalovacího motoru nebo jsou jim úměrné) a otáček kola korunového (otáčky elektromotoru nebo jim úměrné). Výstupní točivý moment kotvy je přímo-úměrný točivému momentu spalovacího motoru a elektromotoru.

Pohon spalovacím motorem – je operační režim, kdy je stavidlo 1 rozpojeno a stavidlo 2 drží dohromady korunové kolo a rám vozidla. V tomto režimu dodává spalovací motor výkon na kola sám. Z rovnic 1.11 a 1.14 vyplývá, že otáčky kotvy jsou úměrné otáčkám centrálního kola $\omega_3 = \frac{1}{1+i_g} \cdot \omega_1$ a výstupní točivý moment kotvy je úměrný točivému momentu, který poskytuje spalovací motor dále centrálnímu kolu $M_3 = (1 + i_g) \cdot M_e$.



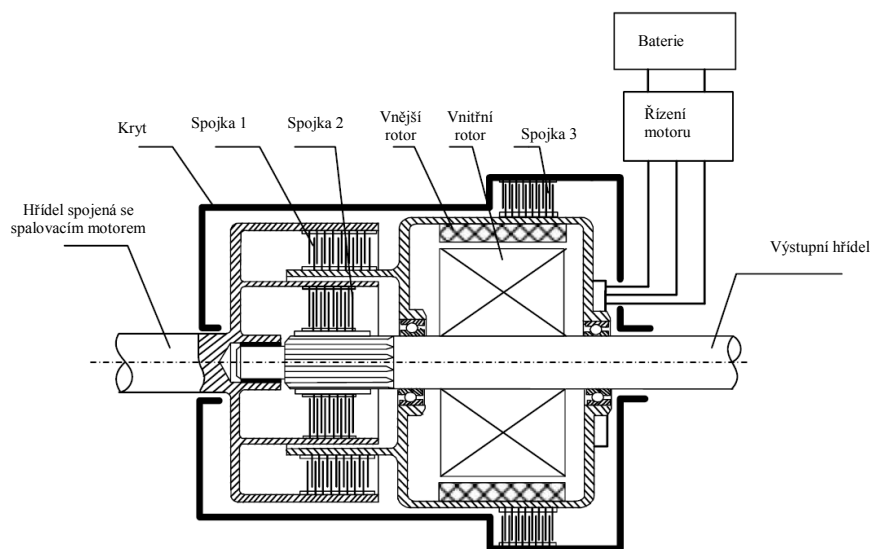
Obr. 1.22 – Hybridní elektrický pohon s otáčkovou spojkou elektromotoru s dvěma rotory

Pohon elektromotorem – je operační režim, kdy stavidlo 1 spojuje centrální kolo k rámu vozidla (spalovací motor je vypnut a spojka je rozpojena) a stavidlo 2 je rozpojeno a tak výkon pro pohon vozidla poskytuje jen elektromotor. Z rovnic 1.11 a 1.14 plyne přímá úměra otáček kotvy a otáček korunového kola $\omega_3 = \frac{i_g}{1+i_g} \cdot \omega_2$, a také nepřímá úměra výstupního točivého momentu kotvy k točivému momentu elektromotoru ve spojení s korunovým kolem $M_3 = -\frac{1+i_g}{i_g \cdot M_m}$.

Rekuperace brzděním – je operační režim, kde jsou stavy stavidel stejné jako u operačního režimu s pohonem elektromotoru (spalovací motor je zde vypnut a jeho spojka rozpojena), který zde slouží jako měnič energie rekuperačního brzdění (záporný moment). Kinetická nebo potenciální energie vozidla může být tímto elektronickým systémem zachycena a distribuována v závislosti na jízdním režimu.

Nabíjení baterie spalovacím motorem – spojka spalovacího motoru, stavidlo 1 a stavidlo 2 jsou ve stejném stavu jako u hybridního režimu. Elektromotor je řízený tak, aby se otáčel opačným směrem (tudíž měl záporné otáčky). Elektrický stroj absorbuje energii spalovacího motoru a nabíjí baterie. Výkon spalovacího motoru je zde rozdělen pomocí otáček na dvě části.

Pohon na obr. 1.22 využívající motor s dvěma rotory má podobnou strukturu jako na obr. 1.21. Stavidla 1 a 2 jsou určena k tomu, aby spojila vnější rotor s rámem vozidla (resp. spojení vnějšího a vnitřního rotoru). Tento pohon využívá všech výše uvedených operačních režimů.



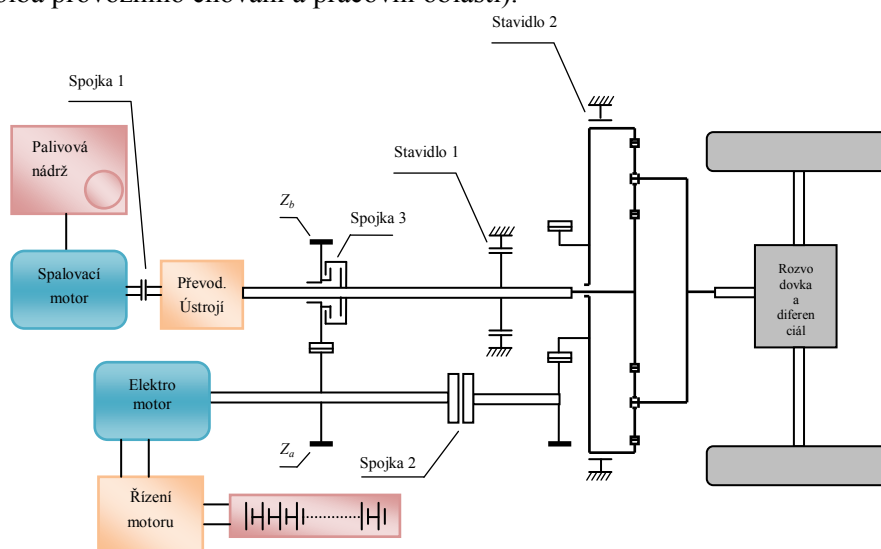
Obr. 1.23 – otáčková spojka s motorem s dvěma rotory [2]

Na obr. 1.23 je zobrazeno spojení otáčkové spojky a motoru s dvěma rotory. Spojky 1 a 2 nahrazují elementy se stejným názvem z obr. 1.22 a spojka 3 nahrazuje funkci stavidla 1. Velkou výhodou hybridního pohonu s otáčkovou spojkou je, že otáčky obou zdrojů energie jsou nezávislé na rychlosti vozidla. Tato výhoda se uplatňuje hlavně u motorů jako je Stirlingův motor a turbínový motor, kde otáčky ovlivňují účinnost zařízení více než točivý moment.

1.2.6 Hybridní pohonné jednotky s oběma druhy spojek

1.2.6.1 Pohonná jednotka s nastavitelnou spojkou

Pokud se kombinují oba dva druhy spojek (momentová a otáčková) vznikne tím hybridní pohon, ve kterém je možné vybrat si z obou druhů těchto spojek. Obr. 1.24 je zobrazen hybridní pohon s vybranou funkcí momentové spojky [4]. Stavidlo 2 uzamyká korunové kolo planetárního převodu k rámu vozidla tehdy, když jsou spojky 1 a 3 sepnuty a spojka 2 rozpojena. Převod Z_A , Z_B a spojka 3 slučují momenty (výkon) spalovacího a elektrického motoru a dále jej poskytují hřídeli centrálního kola. V tomto případě pracuje planetární převod jen jako otáčková spojka. Převodový poměr centrálního kola ke kotvě je definován jako $\frac{\omega_1}{\omega_3} = 1 + i_g$, a reprezentuje tím paralelní hybridní pohon s momentovou spojkou. V režimu s otáčkovou spojkou oddělují stavidla 1 a 2 centrální kolo od korunového a spojky 1 a 2 jsou sepnuty, zatímco je spojka 3 rozepnuta. Otáčky kotvy, která je připojena na řízená kola, jsou kombinací otáček spalovacího motoru a elektromotoru (viz rovnice 1.11). Avšak moment spalovacího motoru, moment elektromotoru a moment řízených kol jsou provázány matematickou rovnicí (viz rovnice 1.14). K optimální výkonnosti této pohonné jednotky přispívá možnost volby spojovacího prvku (momentové, nebo otáčkové spojky) a zdroje energie (volba provozního chování a pracovní oblasti).

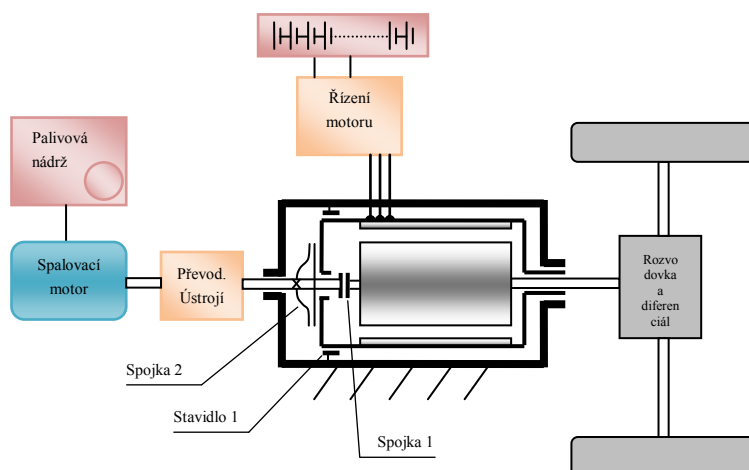


Obr. 1.24 – Hybridní pohon s planetovým převodem

Za nižších rychlostí vozidla je vhodné zvolit provozní režim s momentovou spojkou (pro rychlou akceleraci a velké stoupání). Na druhou stranu ve vyšších rychlostech se používá režim s otáčkovou spojkou, ve kterém se udržují otáčky spalovacího motoru v optimální oblasti. Planetový převod spolu s trakčním motorem na obr. 1.24 mohou být nahrazeny motorem s dvěma rotory (viz obr. 1.25). Pokud bude pohonné ústrojí pracovat s momentovou spojkou, musí spojka 1

spojovat výstupní hřídel převodovky s vnitřním rotorem motoru, spojka 2 naopak rozpojovat vnitřní rotor a hřídel spalovacího motoru, zatímco je stavidlo 1 aktivováno a upevňuje tím vnější rotor s rámem vozidla. Pokud je spojka 1 rozpojena, spojka 2 sepnuta a stavidlo uvolněno, pracuje pohonná ústrojí s otáčkovou spojkou. Charakteristický rysem výše zmiňovaných pohonných ústrojí je možnost zvolení optimálního jízdního režimu na základě různých vnějších podmínek, a tím se zvyšuje účinnost a efektivita celé pohonné jednotky.

Jistá nevýhoda tkví v tom, že pohonná jednotka nemůže pracovat s oběma spojkami současně.



Obr. 1.25 – Hybridní pohonná jednotka s oběma druhy spojek a motorem s dvěma rotory

1.2.6.2 Pohonná jednotka s oběma režimy spojky

Pokud obsahuje pohonná jednotka navíc ještě jeden zdroj energie (oproti konvenčnímu řešení – spalovací motor a elektromotor), je možné realizovat pohon obou spojek ve stejný čas. Takováto jednotka byla vyvinuta a implementována do automobilu Toyota Prius firmou Toyota (viz obr. 1.25). [5] Jednotka obsahuje planetový převod ve funkci zařízení s otáčkovou spojkou a sadu axiálních ozubených kol používaných jako zařízení s momentovou spojkou. Spalovací motor je spojen s kotvou planetového převodu a malý generátor (jednotky kW) je spojen s centrálním kolem a tvoří sestavu s otáčkovou spojkou. Korunové kolo je spojeno s řízenými koly přes axiální převody (momentová spojka) a s trakčním motorem, se kterým tvoří zařízení s momentovou spojkou. Z rovnice 1.11 souvisí úhlová rychlost korunového kola nebo převodu Z_A (přímo - úměrná rychlosti vozidla) s úhlovou rychlostí spalovacího motoru (kotvy) a generátoru (centrálního kola), a může být vyjádřena jako:

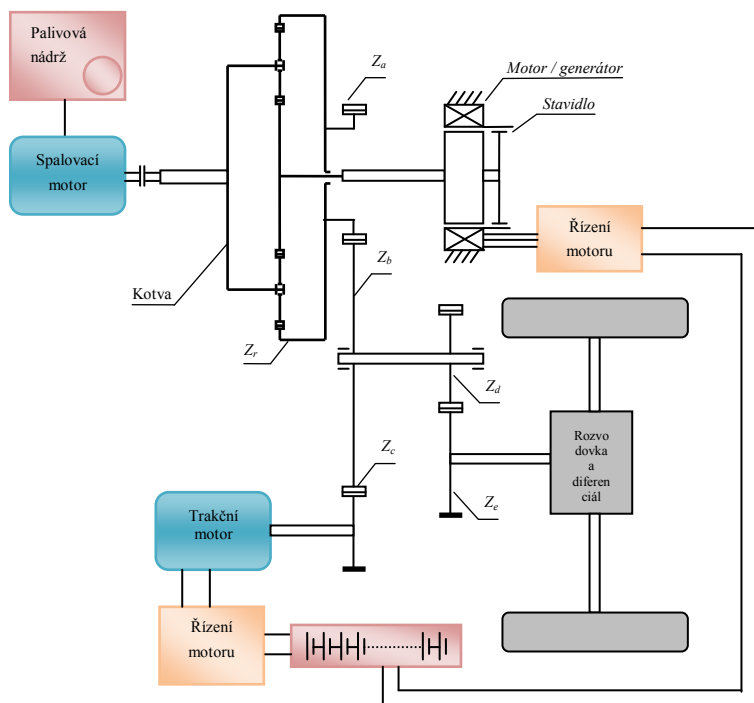
$$\omega_k = \frac{1 + i_g}{i_g} \cdot \omega_m - i_g \cdot \omega_e, \quad (1.17)$$

kde je i_g definován jako převodový poměr z rovnice 1.9 a ω_m a ω_e jsou úhlové rychlosti spalovacího motoru a generátoru.

Zátěžový moment působící na korunovém kole planetového převodu převodem Z_4 je ve vztahu s momentem spalovacího motoru a generátoru:

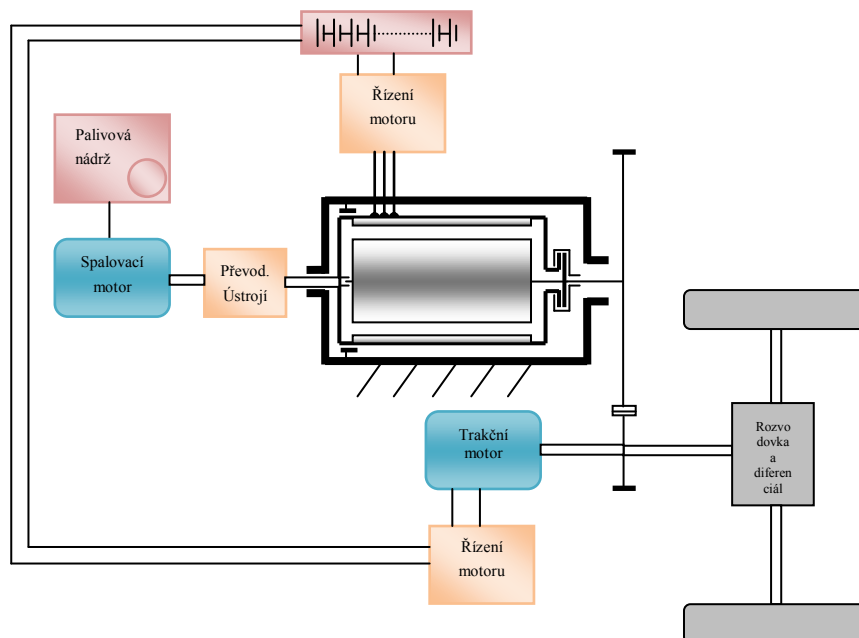
$$-M_k = \frac{i_g}{1 + i_g} \cdot M_m = i_g \cdot M_e \quad (1.18)$$

Z rovnice 1.18 vyplývá, že točivý moment centrálního kola spolu s generátorem má opačný směr otáčení jako točivý moment spalovacího motoru a stejný směr otáčení jako zátěžový moment korunového kola. Při nízkých rychlostech vozidla se generátor otáčí stejným směrem jako spalovací motor a generuje energii (pracuje se záporným výkonem). Výkon motoru je rozdělen mezi generátor a zátěž připojenou přes korunové kolo. Ve vysokých rychlostech vozidla (cílené držení otáček spalovacího motoru pod hranicí dané rychlosti) může generátor pracovat v opačném směru ke spalovacímu motoru a to pozitivně ovlivňuje provozní účinnost motoru. V tomto případě dodává generátor, který je v motorickém režimu, energii planetárnímu převodu. Pro pohonnou jednotku je generátor nezbytnou součástí, jelikož řídí otáčky motoru a odděluje je od otáček kol.



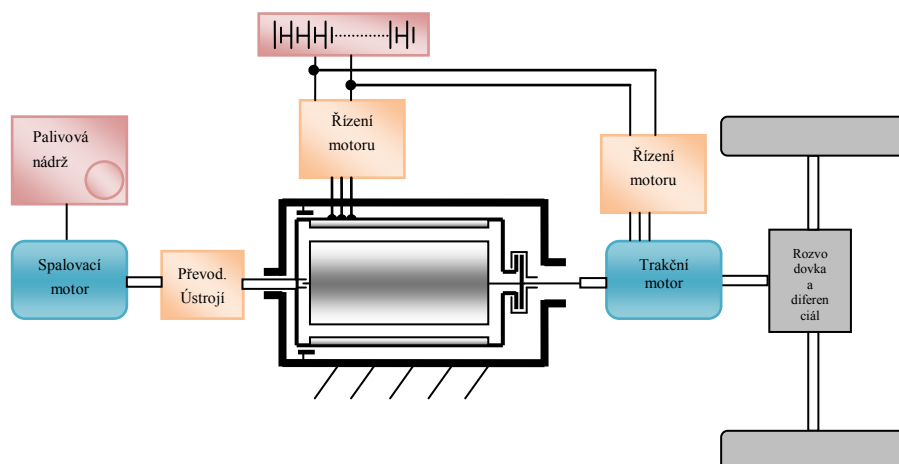
Obr. 1.26 – Hybridní pohonná jednotka s oběma druhy spojek

Točivý moment trakčního motoru se spojuje s výstupním momentem korunového kola planetového převodu (v režimu momentové spojky) pomocí převodu Z_B , Z_C , Z_D a Z_E , které slouží k oddělení točivého momentu od zátěže vozidla. Menší motor a planetový převod na obr. 1.26 můžou být nahrazeny individuálním motorem s dvěma rotory (viz obr. 1.27), který sdílí podobné charakteristiky pohonné jednotky. [6]



Obr. 1.27– Hybridní pohonná jednotka s motorem s dvěma rotory a hřídelí

Další variací hybridní pohonné jednotky z obr. 1.27 je jednotka se společnou hřídelí zobrazená na obr. 1.28. Tato jednotka je kompaktnější kvůli členu obsahujícímu integrovaný trakční motor s motorem s dvěma hřídeli. Na druhou stranu řízení jednotky je komplikovanější než u předchozího případu, jelikož zde ve dvojité vzduchové mezeře působí korelační magnetické pole. [7]

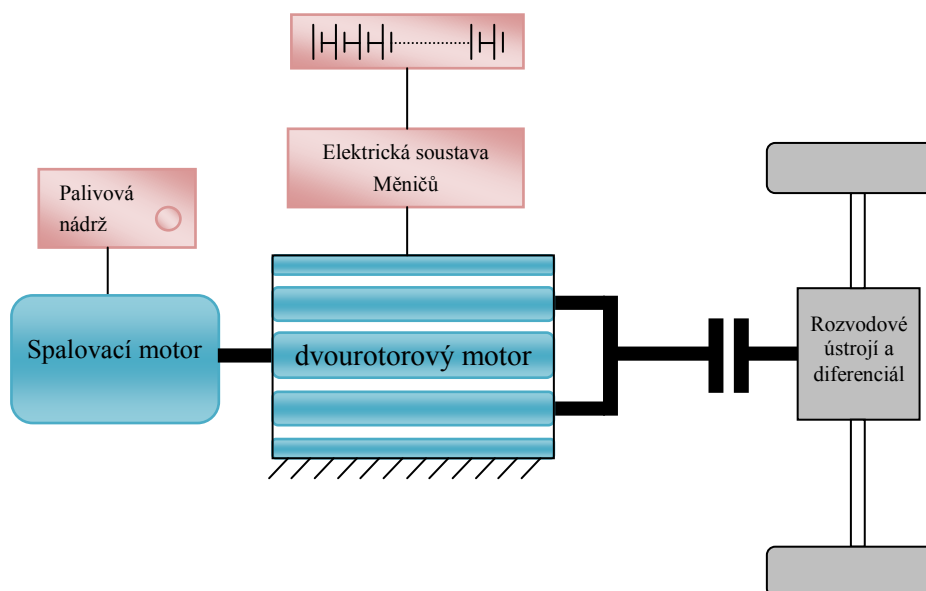


Obr. 1.28 – Hybridní pohonná jednotka s motorem s dvěma rotory a jednou hřídelí

V literatuře se integrovaný člen s trakčním motorem a motorem s dvěma rotory nazývá elektrická variabilní převodovka (anglicky EVS – electrical variable transmission). Tento název je odvozen ze skutečnosti, že otáčky motoru jsou elektricky odděleny od rychlosti vozidla pomocí oddělovače – motoru s dvěma rotory. [8]

2 Koncept hybridního vozidla s využitím děliče výkonu

Tato kapitola se bude zabývat konceptem hybridního vozidla s využitím děliče výkonu (tzv. dvourotorového motoru), jenž je stěžejním prvkem navrhovaného modelu. Navrhované řešení pohonné jednotky je v několika aspektech podobné jako řešení soustavy s variabilní převodovkou.



Obr. 2.1 – Blokové schéma konceptu hybridní jednotky s dvourotorovým motorem

Z obr. 2.1 je zřejmé, že se jedná o sériové zapojení hybridní jednotky. Spalovací motor zde zastupuje funkci konstantního zdroje výkonu pro elektrickou soustavu s Transmotorem. S ohledem na trend snižování spotřeby pohonných hmot bude spalovací motor pracovat v jeho nejefektivnějším bodě na výkonových charakteristikách. Pokud bychom zanedbali vnější podmínky ovlivňující činnost motoru, bude mít spalovací motor nejmenší spotřebu paliva a zároveň pracovat s nejvyšší efektivitou.

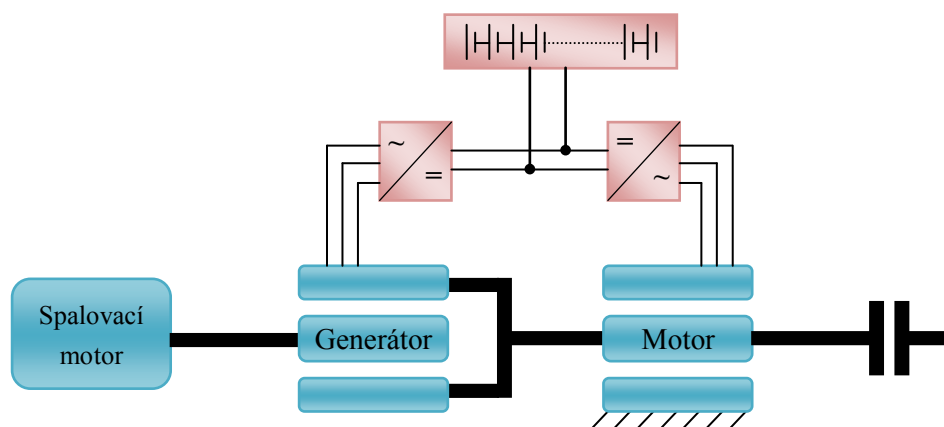
Nejdůležitější částí celého konceptu je dvourotorový motor, který v soustavě pracuje jako:

- 1) Generátor - zpracovává výkon spalovacího motoru elektrické soustavě

- 2) Motor – dodává potřebný výkon, přenášený na kola vozidla
- 3) Dělič výkonu – mění poměr výstupního a vstupního výkonu a tím dokáže napodobit činnost variabilní převodovky
- 4) Rekuperační člen – je schopen zpracovat nadbytečný mechanický výkon ze strany kol (např. při jakémkoli brzdění nebo v jízdním režimu, kdy jede vozidlo z kopce).

Díky konstrukčnímu řešení samotného dvourotorového motoru je možné dle potřeby inteligentně ovládat výkon ve všech jízdních režimech vozidla tak, aby pracovní bod spalovací motor zůstal nezměněn. K tomuto účelu bude sloužit elektrická soustava. Pro jednoduchost a názornost celého konceptu tvoří tuto soustavu dvojice střídačů a baterie.

Další zjednodušení pro výpočty energetické bilance soustavy spočívá v rozdělení dvourotorového motoru na soustavu sériově zapojených asynchronních motorů, z nichž bude jeden pracovat v režimu generátoru a druhý v motorovém režimu. První asynchronní generátor bude mít svůj stator (který bude volně rotovat) spojený s rotorem druhého motoru, jehož stator bude pevně spojen s karosérií vozidla (viz obr. 2.2) a tím se zjednoduší statické výpočty soustavy.



Obr. 2.2 – Blokové schéma hybridní soustavy

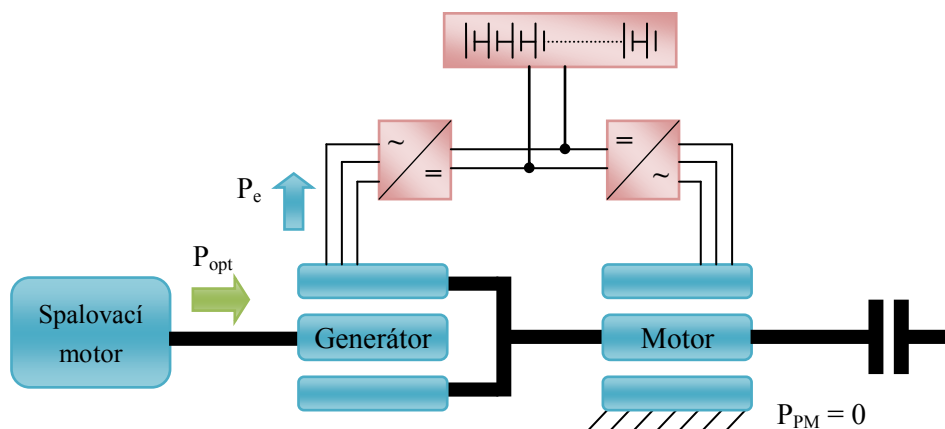
2.1 Provozní stavy hybridní pohonné jednotky

Základem statických výpočtů je rozbor provozních stavů koncepčního řešení soustavy. Pro transparentnost funkce celé soustavy v různých jízdních režimech se zde používá zjednodušené schéma z obr. 2.2. Z hlediska statiky se může systém nacházet v těchto stavech:

1. Výběh

Jde o stav systému, kdy je požadovaný výstupní výkon P_{PM} nulový a hřídel dvourotorového motoru se otáčí naprázdno bez zátěže (v tomto stavu bude pohonná jednotka pracovat tehdy, když bude automobil v klidu s aktivovanou ruční brzdou). Spalovací motor pracuje na bodě své charakteristiky a přenáší vyráběný výkon P_{opt} přes vzduchovou mezeru do společného rotoru (pro názornost je střední rotor dvourotorového motoru rozdělen na dva rotory), odkud se přes kroužky

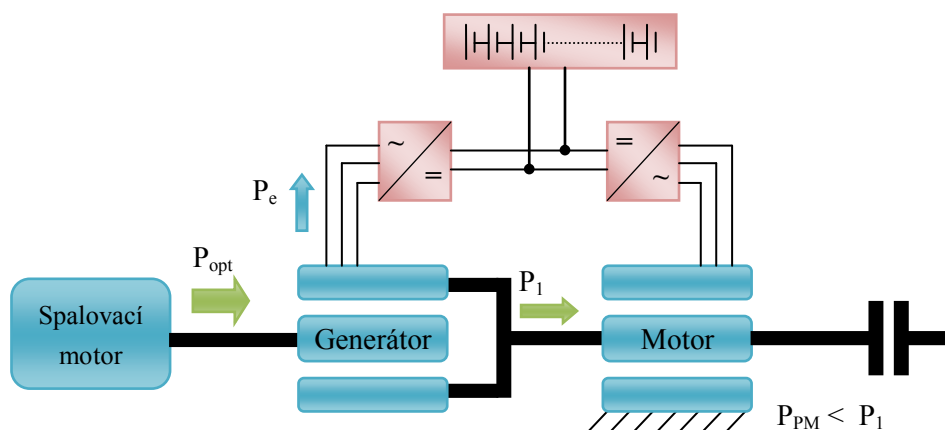
dostává do elektrické sítě a nabíjí baterie (elektrický výkon P_e). Asynchronní motor zde nevyrábí žádnou energii, přesto snižuje generovaný výkon o třecí ztráty společného rotoru.



Obr. 2.3 – Výkony v systému při výběhu pohonné jednotky

2. Nízká zátěž

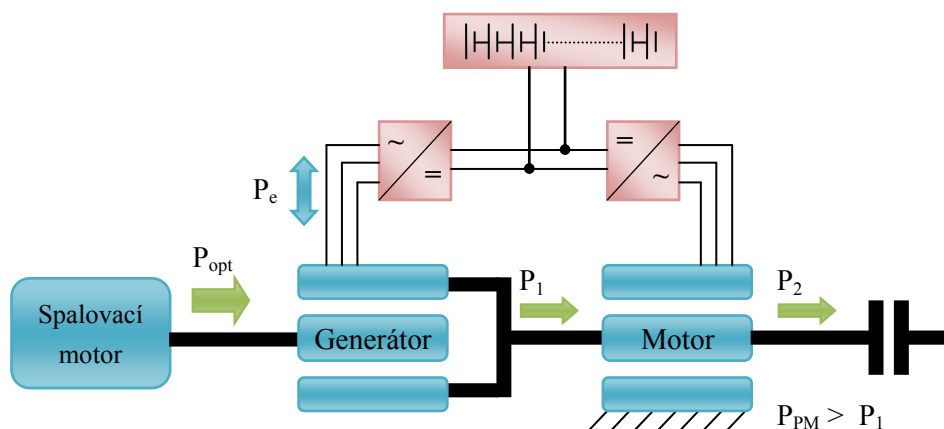
Tento stav systému nastává, pokud bude požadovaný výkon na výstupu (výkon pracovního mechanismu) nižší, než výkon P_1 dodávaný generátorem (v praxi to bude znamenat mírně sešlápnutý plynový pedál). V této chvíli se motor nebude zapojovat do chodu pohonu, jelikož všechen výkon stačí pokrýt generátor. Stejně jako je tomu u výběhu pohonné jednotky, výkon dodávaný spalovacím motorem, se bude přenášet přes vzduchovou mezeru do společného rotoru a bude nabíjet baterie. Jediný rozdíl při nabíjení baterií bude ve skluzu generátoru. Jelikož bude v tomto případě generátor zatěžován, jeho skluz se zvětší a generovaný výkon bude úměrně klesat.



Obr. 2.4 – Výkony v systému při nízké zátěži pohonné jednotky

3. Střední až maximální zátěž

Při velké zátěži hybridního pohonu, tj. při zátěži kdy požadovaný výstupní výkon bude vyšší, než výkon dodávaný generátorem, bude výkonový deficit kompenzovat motor. Z hlediska statických výpočtů momentů soustavy bude motor pracovat i při nižších otáčkách, kdy je výkon generátoru dostačující, ale požadovaný moment je větší, než je schopen tento generátor vyvinout (např. při rozjezdu vozidla). Generovaný výkon do soustavy bude rozdělen do dvou stavů. Při nízkých otáčkách, vysokém požadovaném momentu a malém výkonu se budou baterie nabíjet. Ale pokud požadovaný výkon překročí hranici maximálního výkonu generátoru (z dlouhodobého hlediska je tímto výkonem myšlen jeho jmenovitý výkon) bude veškerý výkon, poskytovaný spalovacím motorem, spotřebováván na provoz generátoru. Aby tato soustava mohla být využita s největší efektivitou, musí být logicky hodnota výkonu spalovacího motoru menší, než jmenovitý výkon dvourotorového motoru. To proto, aby mohl dvourotorový motor, jako universální dělič výkonu, pracovat v tzv. režimu „boost“ (v určitých okamžicích dodávat větší výkon, než je schopen vyrobit spalovací motor).

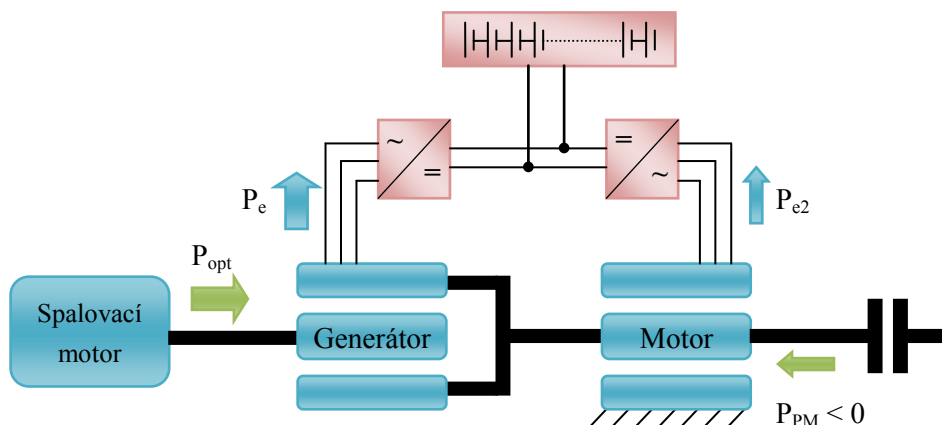


Obr. 2.5 – Výkony v systému při střední až maximální zátěži pohonné jednotky

4. Rekuperační brzdění

Tento režim je nejefektivnější variantou brzdění. Nastává v okamžiku záporného momentu na výstupu pohonné jednotky (při brzdění vozidla z kopce). Výkony v této soustavě budou zpracovávány každý zvlášť. První z nich je výkon dodávaný spalovacím motorem. Tento výkon bude závislý na skluzu generátoru a bude jako v ostatních případech dobíjet baterie. Druhý z nich, výkon P_{e2} bude zachycen motorem a také zpracován k nabíjení baterií. Toto je jeden z dalších bodů, na který bude brán zřetel při návrhu samotného dvourotorového motoru.

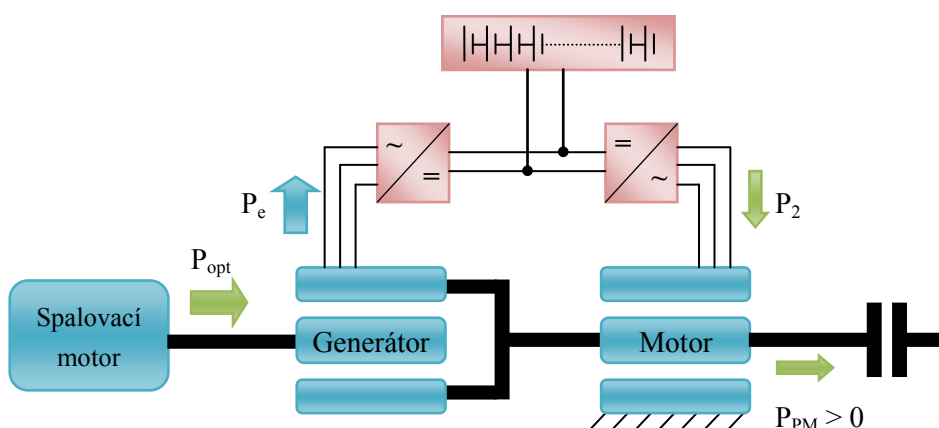
Rekuperační výkon, který bude dvourotorový motor schopen bez problémů zpracovat, bude v ideálním případě menší než jmenovitý výkon motoru (tedy jedné z částí dvourotorového motoru).



Obr. 2.6 – Výkony v systému při rekuperačním brzdění pohonné jednotky

5. Brzdění motorem

V současné době je ustanoveno, že každé vozidlo musí být vybaveno mechanickými brzdami. Proto tento režim bude závislý na vnějších podmínkách. Pokud kola nebudou prokluzovat, tudíž nebude v činnosti systém ABS, bude motor brzdit výstupní hřídel výkonem, který bude udávat prudkost a sílu brzdění vozidla. V tomto okamžiku budou vznikat tepelné ztráty ve statoru motoru a celý systém se bude zahřívat. Dalším aspektem návrhu bude tedy chlazení dvourotorového motoru, zajišťující jeho nejlepší tepelnou účinnost. Nabíjení mechanickým výkonem spalovacího motoru bude obdobné jako v případě rekuperačního brzdění.



Obr. 2.7 – Výkony v systému při brzdění motorem pohonné jednotky

2.2 Statické výpočty hybridní pohonné jednotky s děličem výkonu

Model hybridní pohonné jednotky s děličem výkonu byl navržen v programu Matlab simulink. Jsou zde použity simulace pro režimy pohonu, rekuperace a nulového momentu. Ruční zadání hodnot se nedoporučuje. Při manuální změně vstupních parametrů se může stát, že zadané parametry nebudou v souladu s fyzikální realizovatelností pohonné jednotky a výsledky takového výpočtu budou náhodné. Simulace automaticky dopočítává parametry soustavy děliče výkonu, např. impedance, proudy a napětí v elektrickém systému, velikost synchronní frekvence rotujícího magnetického pole, výkony v soustavě, ztrátové výkony apod.

Parametr	Hodnota
Počet pólů	6 [-]
Jmenovitý výkon	1500 W
Jmenovité napětí	400 V
Jmenovitý proud	4 A
Jmenovitá frekvence	50 Hz
Jmenovitý moment	14,691 Nm
Jmenovité otáčky motoru	975 min ⁻¹
Moment zvratu	29,38245 Nm
Výkon naprázdno	80x2 W
Jmenovitý skluz	0.025 [-]
Odpor vinutí statoru	2,2 Ω
Indukčnost vinutí statoru	25 mH
Odpor vinutí rotoru	1,95 Ω
Indukčnost vinutí rotoru	25 mH
Magnetizační indukčnost	200 mH
Hmotnost rotoru generátoru	5 kg
Hmotnost vstupní hřídele	2 kg
Průměr vstupní hřídele	3 cm
Průměr rotoru generátoru	10 cm
Hmotnost společného rotoru	10 kg
Hmotnost výstupní hřídele	2 kg
Průměr statoru motoru	15 cm
Průměr výstupní hřídele	3 cm
Vstupní otáčky spalovacího motoru	1000 min ⁻¹
Výstupní otáčky dvourotorového motoru	-
Požadovaný moment na výstupu dvourotorového motoru	-
Transformační poměr statoru a rotoru	1,31

Tab. 2. 1 – Parametry soustavy hybridní pohonné jednotky

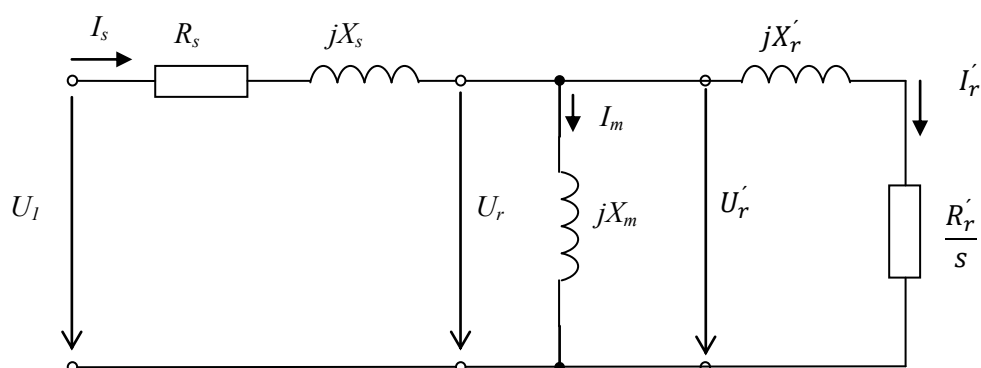
Všechny parametry vypsané v tab. 2.1 se v podstatě dají změnit. Musí se dbát ale na fyzikální realizovatelnost daných parametrů tak, aby byly vypočtené hodnoty správné.

2.2.1 Výpočetní vztahy statického modelu hybridní pohonné jednotky

Základem statických výpočtů je myšlenka provozních stavů hybridní pohonné jednotky (viz kap 2.2). Výpočty pro oba motory jsou skoro totožné. Liší se pouze ve velikosti mechanických ztrát. Počítá se, že většinu ztrát bude pokrývat generátor a motor se bude zapojovat do chodu náhodně (dle zvoleného režimu) s menšími mechanickými ztrátami. Nejdříve bude věnována pozornost elektrickému modelu, na kterém je celý výpočet založen.

2.2.2 Elektrický model hybridní pohonné jednotky

Model hybridní pohonné jednotky s děličem výkonu by nebyl plně funkční bez základního modelu elektrického obvodu. Tento model popisuje vztah mezi statorovým a rotorovým proudem a tvoří základ pro výpočty ztrátových výkonů dvourotorového motoru. [9]

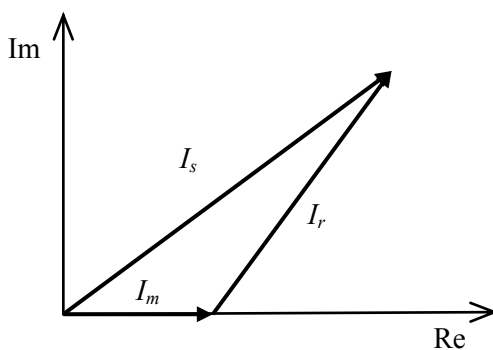


Obr. 2.8 – Zjednodušené schéma AC motoru

Na obr. 2.8 je zobrazen zjednodušený model obvodu jedné fáze asynchronního motoru. Stator je reprezentován odporem vinutí R_s a rozptylovou reaktancí jX_s . Magnetizační větev tvoří reaktance jX_m . U vinutí rotoru se odpor mění nepřímo-úměrně se skluzem motoru $\frac{R_r}{s}$ a jeho vinutí má reaktanci jX_r . Proud se rozděluje vektorově dle vztahu:

$$I_s^2 = I_r^2 + I_m^2. \quad (2.1)$$

Tyto proudy se pak používají k výpočtu ztrátových výkonů v mědi statoru a rotoru dvourotorového motoru.



Obr. 2.9 – Příklad vektorového rozložení proudů asynchronního motoru

Frekvence indukovaného napětí bude v rotoru asynchronního stroje závislá na skluzu:

$$f_r = s \cdot f_s, \quad (2.2)$$

a poté můžeme definovat skutečnou reaktanci rotorového vinutí jako:

$$X_r = 2 \cdot s \cdot \pi \cdot f_r \cdot L_r. \quad (2.3)$$

Napětí rotoru je vázáno transformačním poměrem e mezi závitů statoru a rotoru. Velikost tohoto napětí se počítá jako součin transformačního poměru a interního napětí statoru:

$$U'_r = e \cdot U_r, \quad (2.4)$$

Pro stranu rotoru musíme upravit jeho parametry vinutí dle vztahu:

$$R'_r = e^2 \cdot R_r \quad (2.5)$$

$$X'_r = e^2 \cdot X_r. \quad (2.6)$$

Rotorový proud bude závislý na výkonu přenášeném vzduchovou mezerou. Vztah pro výpočet rotorového proudu je [10]:

$$I'_r = \frac{P_{vm} \cdot s}{m \cdot R'_r}. \quad (2.7)$$

2.2.2.2 Výpočty výkonů v modelu hybridní jednotky

Jak už bylo uvedeno výše. Spalovací motor bude zásobovat generátor konstantním výkonem, který bude dán součinem momentu motoru a úhlové rychlosti sníženým o ztráty mechanické na vstupní hřídeli:

$$P_{opt} = M_{opt} \cdot \omega_{opt} - P_{zm1} \quad [\text{W}]. \quad (2.8)$$

Přídavné ztráty od spalovacího motoru po rotor generátoru se počítají ze vztahu [11]:

$$P_{zh1} = 1,2 \cdot \frac{c_{f1}}{2} \cdot \omega_{out}^3 \cdot (R_{rot1}^5 - R_{h1}^5) \quad [\text{W}]. \quad (2.9)$$

Průměry obou součástí (rotoru dvourotorového motoru a jeho vstupní hřídele) se do vztahu dosazují v jednotkách m .

Koeficient aerodynamického odporu se počítá za pomoci Reynoldsova čísla:

$$c_{f1} = \frac{3,87}{\sqrt{Re_1}} \quad [-] \quad (2.10)$$

Reynoldsovo číslo pro část od spalovacího motoru po generátor se určuje ze vztahu:

$$Re_1 = \rho \cdot \frac{\omega_{opt}}{\mu} \cdot R_{rot1} \quad [-] \quad (2.11)$$

Hodnota hustoty vzduchu při tlaku 1 atm je $\rho = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a dynamická viskozita vzduchu má hodnotu $\mu = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

Třecí ztráty v ložiskách na stejném úseku se počítají ze vztahu [11]:

$$P_{fr2} = 0,06 \cdot \frac{k_{fb1} \cdot \omega_{opt}}{2 \cdot \pi} \cdot m_{s1} \quad [\text{W}], \quad (2.12)$$

kde byla zvolena hodnota koeficientu $k_{fb2} = 1$. Hodnoty hmotností hřídele a rotoru se do vztahu dosazují v kg.

Mechanické ztráty se pak vypočítají jako součet třecích, přídavných a ventilátorových ztrát (ztráty ventilací byly v tomto případě zanedbány; vychází se z předpokladu, že motor bude chlazen pouze okolním vzduchem):

$$P_{zm1} = P_{zh1} + P_{fr1} \quad [\text{W}]. \quad (2.13)$$

Mechanický výkon bude generátor přeměňovat na výkon elektrický, který bude závislý na otáčkách výstupní hřídele a ztrátách v generátoru (ztráty v mědi, železe a mechanické):

$$P_e = P_{opt} \cdot (1 - s_v) - P_{stcu1} - P_{stfe} - P_{rotcu1} - P_{rotfe} - P_{zm} \quad [\text{W}]. \quad (2.14)$$

Ztráty P_{stfe} a P_{rotfe} zahrnují také ztráty vířivými proudy a ztráty hysterezní skluz s_v generátoru je dán relativním rozdílem otáček dvourotorového motoru (vstupních a výstupních).

Vztah pro statorové ztráty v mědi statoru při 120 °C [12]:

$$P_{stcu1} = 3 \cdot R_s \cdot \frac{(120 + 235)}{(30 + 235)} \cdot \left(\frac{I_s}{\sqrt{3}} \right)^2 \quad [\text{W}]. \quad (2.15)$$

Obdobně se vypočte i ztrátový výkon v mědi rotoru při 120 °C:

$$P_{rotcu1} = 3 \cdot R_r' \cdot \frac{(120 + 235)}{(30 + 235)} \cdot \left(\frac{I_r'}{\sqrt{3}} \right)^2 \quad [\text{W}]. \quad (2.16)$$

Vztah pro ztráty P_{rotfe} v generátoru:

$$P_{rotfe} = P_{vm1} - P_{zm} - P_1 - P_{rotcu1} \quad [\text{W}]. \quad (2.17)$$

P_{zm} jsou mechanické ztráty dvourotorového motoru (jsou uvedeny níže v kap. 2.2.3).

Transformované napětí rotoru se počítá ze vztahu pro výpočet momentu zvratu dvourotorového motoru [10]:

$$U_r' = e \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot M_{max}}{3 \cdot \omega_s^2 \cdot L_r}} \quad [\text{V}]. \quad (2.18)$$

Skluz generátoru je v celém rozsahu výstupních otáček stejný (má konstantní hodnotu jmenovitého skluzu $s_{1n} = 0,025$).

Synchronní rychlost generátoru se určuje z napájecí frekvence a počtu pólových páru stroje:

$$\omega_{s1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{s1}}{2 \cdot p} \quad [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]. \quad (2.19)$$

Důležitý parametr asynchronního motoru je skluz zvratu, ten je určený synchronní frekvencí generátoru a konstrukčními parametry dvourotorového motoru (parametry rotorového vinutí), které vychází z elektrického schématu pro asynchronní motor (viz kap. 2.2.2.1):

$$s_{m1} = \frac{R_r}{\omega_{s1} \cdot L_r} \quad [-]. \quad (2.20)$$

Konečný moment generátoru se určí z upraveného Klossova vztahu:

$$M_1 = \frac{M_{max} \cdot s_1 \cdot s_{m1}}{s_{m1}^2 + s_1^2} \quad [\text{Nm}]. \quad (2.21)$$

Mechanický výkon, který bude generátor schopen vyvinout je dán součinem momentu a výstupní úhlovou rychlostí společného rotujícího prvku. Vztah pro celkový potřebný výkon tedy bude následující:

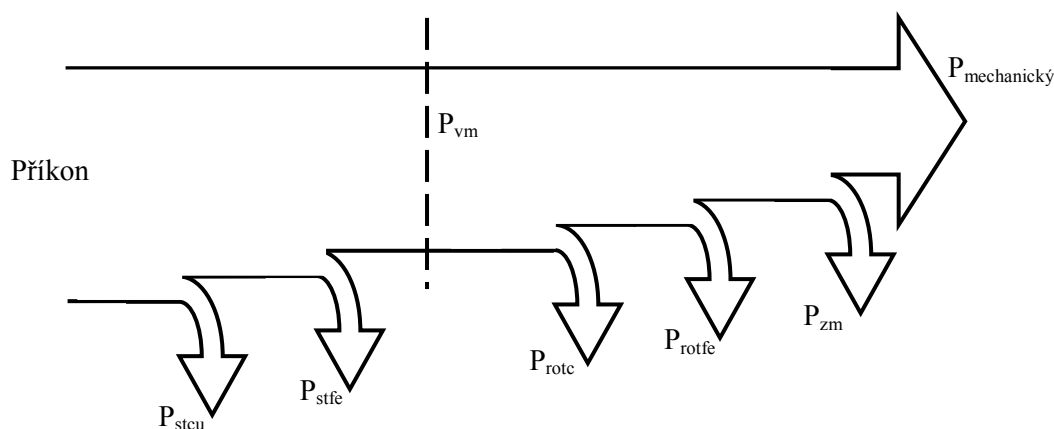
$$P_{příkon1} = P_{vm1} + P_{stcu1} + P_{stfe1} \quad [\text{W}]. \quad (2.22)$$

Ztráty ve statorovém vinutí v železe (zahrnující ztráty vířivými proudy a hysterezní ztráty)

$$P_{stfe} = P_0 - P_{stcu1(30^\circ\text{C})} - P_{rotfe} \quad [\text{W}]. \quad (2.23)$$

Obdobné vztahy platí pro asynchronní motor, kde se dosazují hodnoty veličin dle zadaných parametrů výpočtu.

Na obr. 2.10 je tradiční rozdělení výkonů soustavou asynchronního motoru. Výkon ve vzduchové mezeře je oproti příkonu menší o ztráty ve statorovém vinutí. Výstupní mechanický výkon na výstupní rotorové hřídeli je menší o ztráty ve vinutí rotoru a mechanické ztráty.



Obr. 2.10 – Energetické toky v asynchronním motoru

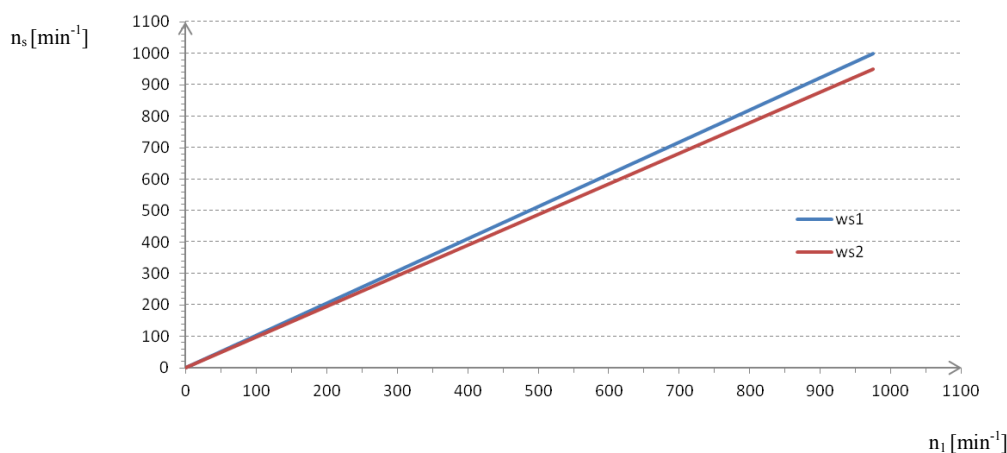
2.2.3 Simulační model v programu Matlab simulink

Tato kapitola bude věnována numerickým simulacím modelu hybridní pohonné jednotky s děličem výkonu. Zadávaní hodnot modelu probíhá, jak bylo výše zmíněno, dle zadaného režimu simulace.

A. Simulace s nulovým požadovaným momentem

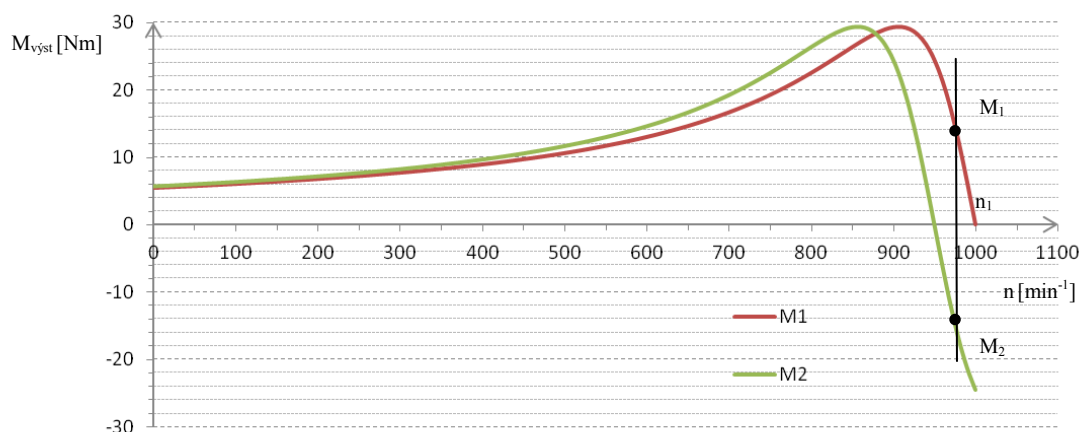
Při této simulaci se bude výstupní rychlost hřídele dvourotorového motoru měnit. Motor bude přibrzďovat generátor přesně stejným momentem opačného směru (jmenovitým momentem). Tím si dvourotorový motor udrží na výstupu nulový moment v celém rozsahu otáček (za předpokladu, že bude spojka na výstupu dvourotorového motoru rozpojená).

Výstupní otáčky se budou měnit v rozsahu od 0 – 1000 min^{-1} . Momenty obou strojů budou stejné, jen budou mít opačné znaménka $M_1 = M_2 = 14,691 \text{ Nm}$. Výstupní moment tedy bude nulový $M_{pm} = 0 \text{ Nm}$.



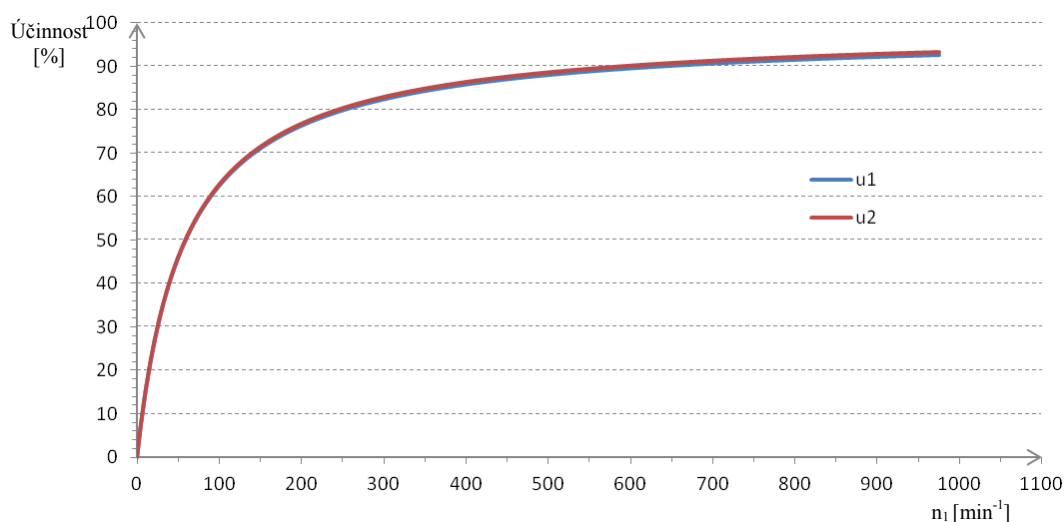
Obr. 2.11 – Synchronní rychlosti generátoru a motoru

Synchronní otáčky se budou lišit o \pm skluz stroje od výstupních otáček tak, aby se momenty generátoru a motoru navzájem vyrušily.



Obr. 2.12 – Momentové charakteristiky dvourotorového motoru ve statickém režimu

Na obr. 2.12 jsou zobrazeny momentové charakteristiky při konstantní napájecí frekvenci. Bod na charakteristice zobrazuje jeden ze stavů systému při frekvenčním řízení dvourotorového motoru. Dochází zde k vyrušení momentů stroje a tím k ustálení hodnoty otáček v bodě $n_1 = 975 \text{ min}^{-1}$. Další body momentů jsou ve stejné úrovni jako všechny ostatní. Tudiž se posouvají vodorovně ve směru osy x a momenty se v každém bodě charakteristiky vyruší a na výstupu zůstává nulový moment.



Obr. 2.13 – Účinnosti generátoru a motoru při nulovém momentu

Účinnost obou strojů v rámci hybridní jednotky je skoro totožná, liší se pouze mechanickými ztrátami, které jsou větší u generátoru, jenž musí překonávat větší odpor při provozu.

B. Simulace hybridní jednotky v režimu pohonu

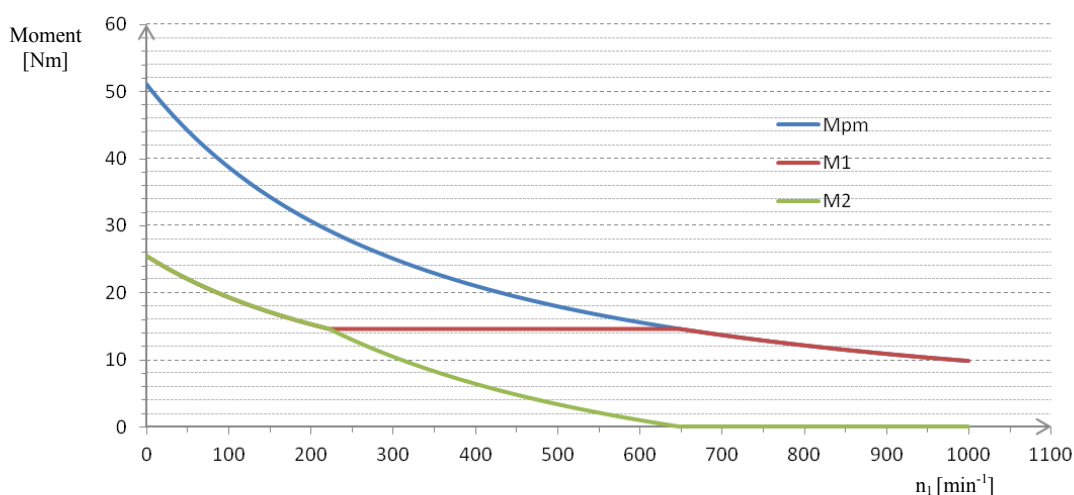
Při režimu pohonu se dvourotorový motor chová jako dělič mechanického a elektrického výkonu. Mechanický výkon je rozdělován, dle oblastí charakteristik mezi oba motory, které pak spolupracují a kompenzují požadovaný výkon na výstupu.

Požadovaný moment pracovního mechanismu a jeho rozdělení mezi oba stroje je podstatou celého statického výpočtu soustavy. Při rovnici momentové rovnováhy:

$$M_1 + M_2 = M_{pm}, \quad (2.24)$$

kde je M_1 moment generátoru, M_2 moment motoru a M_{pm} reprezentuje zátěžový moment, se momenty obou strojů budou dělit dle stavů v kap. 2.1.

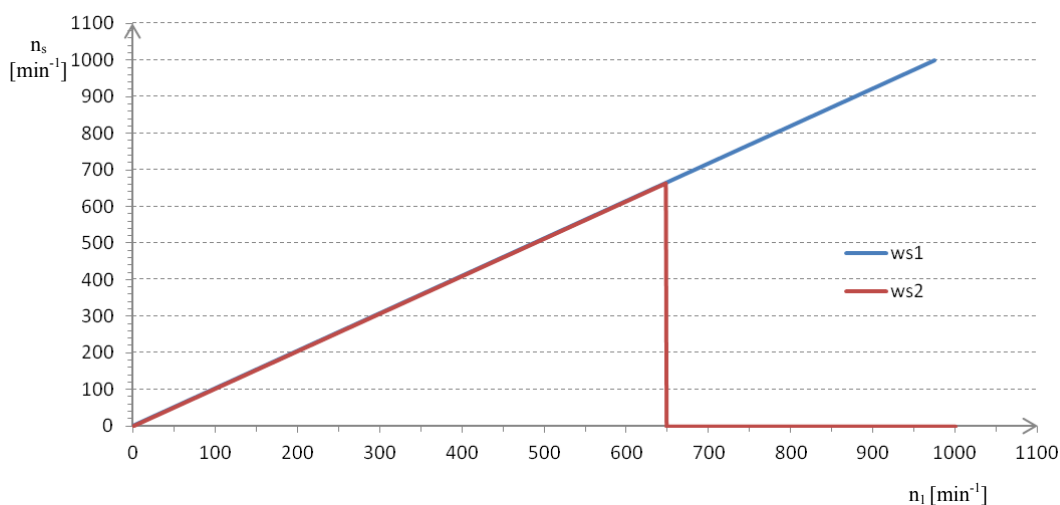
Na obr. 2.14 jsou znázorněny momenty pracovního mechanismu, generátoru a motoru působící v soustavě pohonu. Momenty dvourotorového motoru se počítají v souladu s rovnováhou momentů v soustavě a bere se zde v potaz i jmenovitý výkon strojů (jmenovitý moment, jelikož je výstupní rychlost otáčení pro oba dva stroje i pracovní mechanismus stejná).



Obr. 2.14 – Momenty v soustavě hybridního děliče výkonu

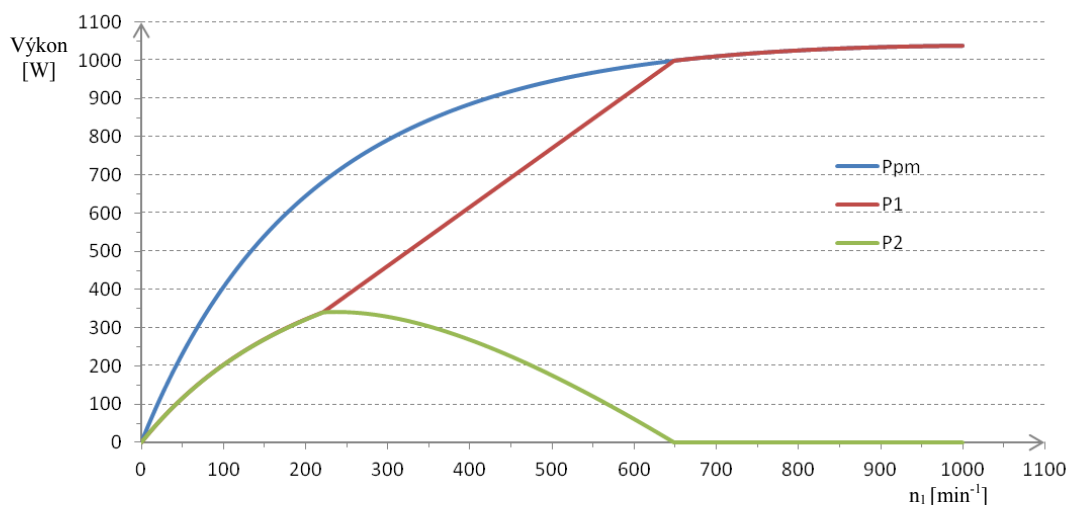
Do zhruba 250 min⁻¹ se momenty rozdělují v poměru 1:1, jelikož je požadavek na výstupní moment větší než součet jmenovitých momentů obou strojů. Poté je oblast od 250 min⁻¹ do 650 min⁻¹, kde si generátor udržuje jmenovitý moment (nepřekročí se ale jmenovitý výkon generátoru) a moment motoru se v rámci snižování momentu výstupního také snižuje. Další oblast od 650 min⁻¹, je oblast, kdy je požadovaný výkon menší než výkon generátoru a proto se motor přestane napájet a všechny potřebný výkon vyrábí generátor sám.

Obr. 2.15 popisuje chování obou motorů. Je zde vidět „odpojení“ napájení motoru. Synchronní otáčky motoru budou poté nulové a velikost výkonu dvourotorového motoru bude menší jen o ztráty v ložiscích na jeho výstupu.



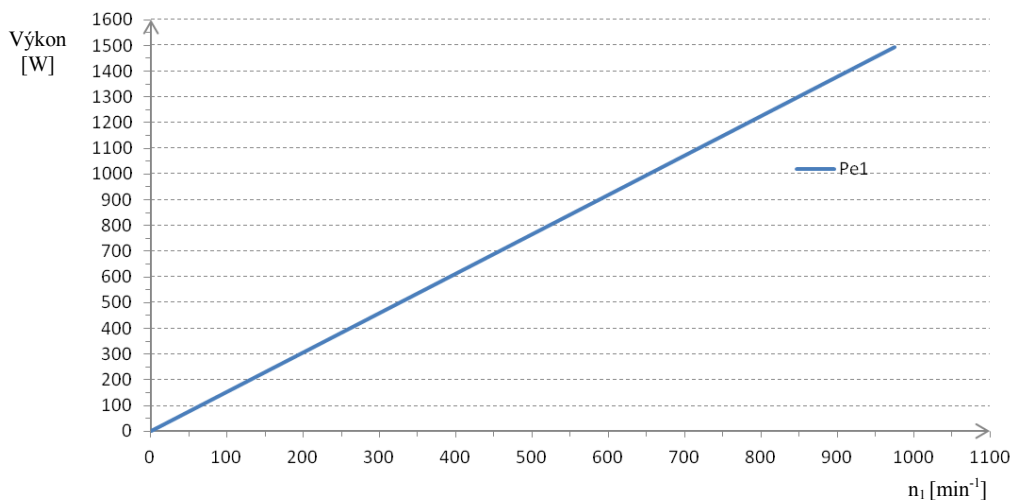
Obr. 2.15 – Synchronní otáčky obou motorů

V podstatě se v soustavě hybridního děliče používá motor jako tzv. „booster“ výkonu, tj. že zvyšuje výkon generátoru o doplněk do požadovaného výkonu na výstupu dvourotorového motoru (viz obr. 2.16). Výkony jsou analogií momentů, a z toho vyplývá, že se v rámci výstupních otáček opět rozdělují do 3 částí. První část, do 250 min⁻¹, se výkony rozdělují v poměru 1:1, až narazí na oblast od 250 min⁻¹ do 650 min⁻¹, kde se výkon generátoru lineárně zvyšuje (udržuje si jmenovitý moment) a výkon motoru je doplňkem do požadovaného výstupního výkonu. Poté se v oblasti od 650 min⁻¹ motor přestane napájet a jeho výkon tedy bude nulový. Všechny výkon bude vyrábět generátor.



Obr. 2.16 – Velikosti výkonů v soustavě hybridního pohonu

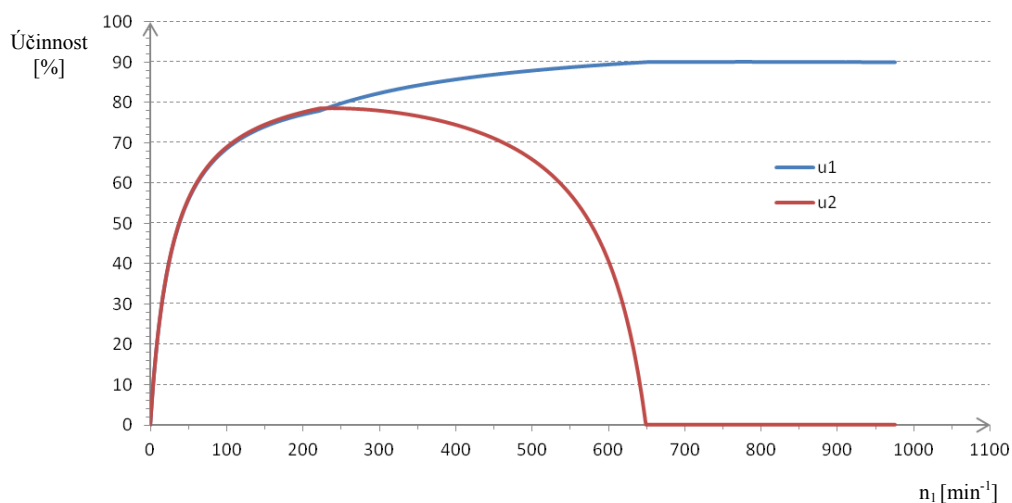
Elektrický výkon vyráběný spalovacím motorem bude závislý na otáčkách výstupní hřídele. Čím vyšší budou otáčky na výstupu, tím více se bude přenášet výkonu k nabíjení baterií.



Obr. 2.17 – Elektrický výkon generátoru

Hodnoty skluzu se v rozsahu řízení dvourotorového motoru nemění (zůstávají přibližně na hodnotě jmenovitého skluzu $s = 0,025$), jelikož jsou řízeny frekvenčními měniči, které budou zajišťovat správné napájecí parametry obou strojů. Od 650 min^{-1} se motor přestane napájet a jeho skluz poté nebude ovlivňovat dění v soustavě hybridního děliče. Navíc hodnota výkonu dodávaného do elektrické sítě bude v okamžiku vyšší, než požadovaný výkon, a tudíž bude dvourotorový motor při této jízdě nabíjet baterie a zároveň poskytovat dostatek výkonu k pohonu vozidla.

Na obr. 2.18 jsou zobrazeny účinnosti obou strojů v plném rozsahu výstupních otáček. Od přibližně 320 min^{-1} se účinnost motoru začíná exponenciálně snižovat, jelikož bude motor pracovat v oblasti za jmenovitým momentem na momentové charakteristice. Účinnost generátoru ale poroste, jelikož bude pracovat se stálým – jmenovitým momentem a otáčky společného rotoru se nadále budou zvětšovat (účinnost se bude přibližovat jmenovité hodnotě účinnosti stroje). Účinnost zůstává téměř konstantní od 65% až 100% zátěže.



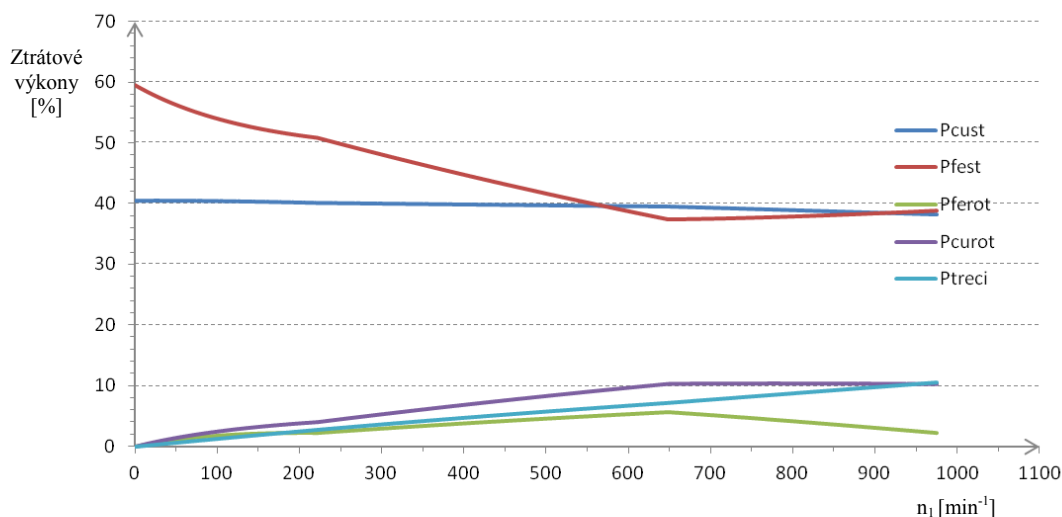
Obr. 2.18 – Účinnosti generátoru a motoru v soustavě hybridního pohonu

Pro zvýšení účinnosti asynchronních motorů se v dnešní době používá mnoho prvků, jako např.: silikonová ocel, zvětšení tloušťky drátu vinutí (pro snížení odporu vinutí), zmenšení vzduchové mezery, prodloužení jádra (pro zvětšení aktivního materiálu), užší elektro-plechy, kvalitnější ložiska, měděná rotorová mřížka, menší ventilátory aj.

Ztráty v mědi stroje se zvětšují exponenciálně s narůstajícím proudem ve vinutí jak statoru, tak rotoru. V tomto případě se jedná na své poměry o stroj s velmi malým odporem vinutí, jak statoru, tak rotoru. Ztráty v mědi rotoru jsou pak přímo-úměrné skluzu stroje, takže pro snížení ztrát v rotoru by bylo vhodné snížit velikost vzduchové mezery a proudovou hustotu. Z tohoto vyplývá, že čím blíže se bude aktuální skluz stroje přibližovat k jmenovitému skluzu, tím menší budou ztráty v mědi stroje (což v soustavě zajišťuje dvojice měničů).

Ztráty v železe stroje (špičkovými proudy a hysterezi) - ztráty v jádře a ztráty magnetizací jsou zde počítány jako jedna hodnota ztrát v železe P_{fe} . Na základě výpočtu tedy jsou největší položkou ztrát dvourotorového motoru. Ztráty v magnetickém jádře jsou nezávislé na zátěži stroje, a jejich hodnota mění s napájecím napětím (pohybuje v rozmezí od 20 do 25% celkových ztrát). Jsou zde odděleny od mechanických ztrát dvourotorového motoru, ale v simulačním modelu se počítají na základě výkonu naprázdno.

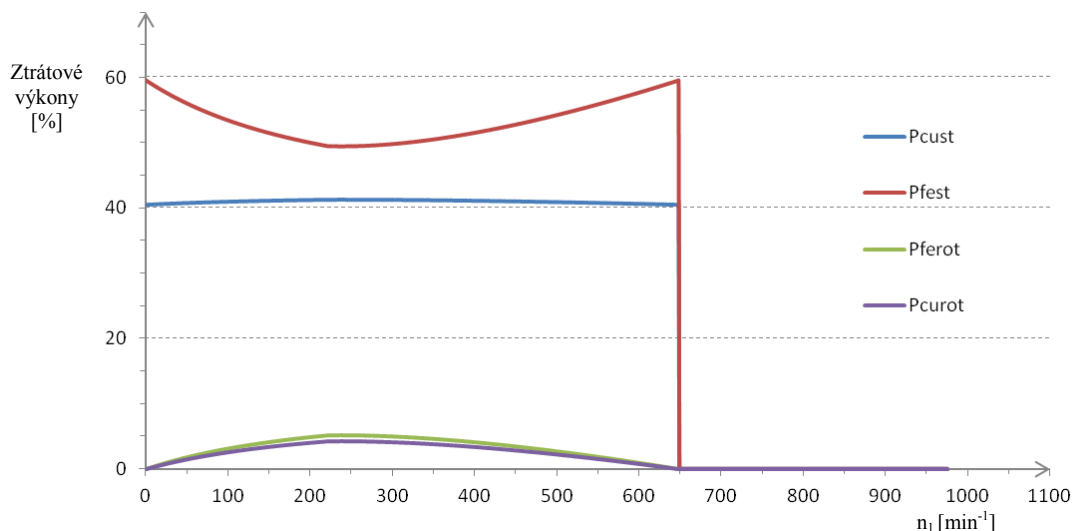
Mechanické ztráty, ztráty třením v ložiskách stroje a ztráty ventilační jsou v modelu hybridního pohonu spojeny v jeden celek (pro zjednodušení jsou ztráty ventilací nulové). Celkové mechanické ztráty se zhruba pohybují okolo 10% celkových ztrát a jsou nezávislé na zatížení stroje.



Obr. 2.19 – Ztrátové výkony generátoru v soustavě hybridního pohonu

Na obr. 2.19 jsou největší položkou ztráty P_{fest} ve statoru, které do 250 min^{-1} mírně exponenciálně klesají, až na hodnotu okolo 50 %. Je to způsobeno exponenciálním klesáním momentu generátoru (moment je přímo-úměrný kvadrátu napájecího napětí), a tudíž ztráty P_{ferot} se naopak budou exponenciálně zvětšovat. Ztráty v mědi stroje se zvyšují exponenciálně dle proudů vinutí, ale jelikož jde o řízení frekvenčními měniči, proud statorem se mění jen mírně. Na charakteristice od

650 min⁻¹, se pak všechny ztráty zvyšují, až na ztráty v železe rotoru, které díky snižujícímu se momentu ve vysokých otáčkách budou postupně klesat.



Obr. 2.20 – Ztrátové výkony motoru v soustavě hybridního pohonu

Na obr. 2.20 můžeme pozorovat stejné chování ztrát v motoru, jako tomu je v případě generátoru, s výjimkou oblasti od 650 min⁻¹, kdy se u motoru odpojí napětí a motor tak nebude zasahovat do chodu generátoru. Ztráty v železe jsou u motoru velmi vysoké a jsou způsobeny nelineálním snižováním momentu v oblasti středních otáček.

Příklad výpočtu pro generátor

Výstupní rovnice pro generátor jsou stejné, jako pro motor. Oba dva tyto stroje tvoří dvourotorový motor, a proto musí mít i stejné konstrukční parametry. Generátor je navíc schopen přenášet energii spalovacího motoru bateriové soustavě při běžném provozu. Jediným rozdílem tedy bude řízení obou strojů, které se bude odvíjet od požadovaného výkonu na výstupu dvourotorového motoru.

Příklad výpočtu je zde pro hodnoty výstupních otáček $n_1 = 975 \text{ min}^{-1}$ a požadovaného momentu $M_{pm} = 10,15 \text{ Nm}$.

Požadovaný výstupní výkon bude tedy:

$$P_{pm} = M_{pm} \cdot \omega_{out} = 10,15 \cdot \frac{975}{60} \cdot 2 \cdot \pi = 1036 \text{ W} \quad (2.25)$$

V ustáleném stavu bude muset generátor kompenzovat výstupní výkon:

$$P_{m1} = M_1 \cdot \omega_{out} = 10,15 \cdot \frac{975}{60} \cdot 2 \cdot \pi = 1036 \text{ W} \quad (2.26)$$

Frekvence napájecího napětí generátoru bude dána hodnotou synchronních otáček

$$\omega_s = 1000 \text{ min}^{-1}:$$

$$f_s = 3 \cdot \frac{n_s}{2 \cdot \pi} = 3 \cdot \frac{1000}{2 \cdot \pi} = 50 \text{ Hz} \quad (2.27)$$

Pro další výpočty je nutný výpočet impedancí a reaktancí ve vinutí rotoru.

Pro transformovanou reaktanci cívky rotorového vinutí platí:

$$\begin{aligned} X'_r &= 2 \cdot \pi \cdot e^2 \cdot s \cdot f_s \cdot L_r = 2 \cdot \pi \cdot 1,31^2 \cdot 0,025 \cdot 159,15 \cdot 0,025 \\ &= 336,96 \text{ m}\Omega \end{aligned} \quad (2.28)$$

Pro transformovaný odpor vinutí rotoru platí:

$$R'_r = e^2 \cdot R_r = 1,31^2 \cdot 1,95 = 3,346 \Omega \quad (2.29)$$

Pro vztahy do výpočtů se používá přepočtená hodnota rotorového odporu $\frac{R'_r}{s} = 262,4 \Omega$.

Impedance magnetizační větve:

$$Z_m = \omega_s \cdot L_m = 104,72 \cdot 0,2 = 20,944 \Omega \quad (2.30)$$

Rotorové napětí indukované přes vzduchovou mezeru [10]:

$$U'_r = e \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot M_{max}}{3 \cdot \omega_s^2 \cdot L_r}} = 1,31 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 29,38}{3 \cdot 104,72^2 \cdot 0,025}} = 96 \text{ V} \quad (2.31)$$

Za předpokladu, že moment vytvářený ve vzduchové mezeře se počítá, dle vztahu:

$$M_1 = \frac{P_{vm1}}{\omega_s} \quad (2.32)$$

můžeme vypočítat velikost rotorového proudu jako [10]:

$$I'_r = \sqrt{\frac{P_{vm1} \cdot s}{3 \cdot R'_r}} = \sqrt{\frac{1063 \cdot 0,025}{3 \cdot 3,346}} = 1,63 \text{ A} \quad (2.33)$$

Velikost magnetizačního proudu bude dána:

$$I_m = \frac{U_r}{Z_m} = \frac{73,28}{20,944} = 3,499 \text{ A} \quad (2.34)$$

Poté se vypočte statorový proud, který bude dán vektorovým součtem obou proudů:

$$I_s = \sqrt{I_m^2 + I_r^2} = \sqrt{1,63^2 + 3,499^2} = 3,859 \text{ A} \quad (2.35)$$

Ztrátový výkon v mědi statoru je určený ze vztahu [12]:

$$P_{stcu1} = 3 \cdot R_s \cdot \frac{(120 + 235)}{(30 + 235)} \cdot \left(\frac{I_s}{\sqrt{3}} \right)^2 \quad (2.36)$$

$$= 3 \cdot 2,2 \cdot \frac{(120 + 235)}{(30 + 235)} \cdot \left(\frac{3,859}{\sqrt{3}} \right)^2 = 43,88 \text{ W.}$$

Stejně tak se počítají ztráty v rotorovém vinutí:

$$P_{rotcu1} = 3 \cdot R_r' \cdot \frac{(120 + 235)}{(30 + 235)} \cdot \left(\frac{I_r'}{\sqrt{3}} \right)^2 \quad (2.37)$$

$$= 3 \cdot 3,346 \cdot \frac{(120 + 235)}{(30 + 235)} \cdot \left(\frac{1,63}{\sqrt{3}} \right)^2 = 11,87 \text{ W.}$$

Mechanický ztrátový výkon dvourotorového motoru je složený ze dvou ztrátových výkonů, a to jsou:

1) Ztrátový výkon středového společného rotoru [11]

$$P_{zh2} = 1,2 \cdot \frac{\sqrt{\frac{3,87}{\rho \cdot \frac{\omega_{out}}{\mu} \cdot R_{rot2}}}}{2} \cdot \omega_{out}^3 \cdot (R_{rot2}^5 - R_{rot1}^5) + 0,06 \cdot \frac{k_{fb2} \cdot \omega_{out}}{2 \cdot \pi} \cdot m_{s1} \quad (2.38)$$

$$= 1,2 \cdot \frac{\sqrt{\frac{3,87}{1,2 \cdot \frac{102,1}{1,8 \cdot 10^{-5}} \cdot 0,15}}}{2} \cdot 102,1^3 \cdot (0,15^5 - 0,1^5) + 0,06 \cdot \frac{1 \cdot 102,1}{2 \cdot \pi} \cdot 10 = 10,17 \text{ W}$$

2) Ztrátový výkon na výstupu dvourotorového motoru [11]

$$P_{zh3} = 1,2 \cdot \frac{\sqrt{\frac{3,87}{\rho \cdot \frac{\omega_{out}}{\mu} \cdot R_{h3}}}}{2} \cdot \omega_{out}^3 \cdot R_{h3}^5 + 0,06 \cdot \frac{k_{fb3} \cdot \omega_{out}}{2 \cdot \pi} \cdot m_{h3} \quad (2.39)$$

$$= 1,2 \cdot \frac{\sqrt{\frac{3,87}{1,2 \cdot \frac{102,1}{1,8 \cdot 10^{-5}} \cdot 0,03}}}{2} \cdot 102,1^3 \cdot 0,03^5 + 0,06 \cdot \frac{1 \cdot 102,1}{2 \cdot \pi} \cdot 10 = 1,95 \text{ W}$$

Celkový ztrátový mechanický výkon bude součtem obou ztrátových výkonů:

$$P_{zm} = P_{zh2} + P_{zh3} = 12,12 \text{ W.} \quad (2.40)$$

Ztráty v železe rotoru jsou počítány ze vztahu:

$$\begin{aligned} P_{ferot1} &= P_{vm} - (P_1 + P_{rotcu1} + P_{zm}) \\ &= 1063 - (1036 + 11,87 + 12,12) = 3 \text{ W.} \end{aligned} \quad (2.41)$$

Ztráty v železe statoru jsou spočteny z výkonu naprázdno (ve většině případů se pro složitost výpočtů ztrát v železe určují ztráty odhadem) jako:

$$\begin{aligned} P_{fest1} &= P_0 - \left(3 \cdot R_s \cdot \left(\frac{I_s}{\sqrt{3}} \right)^2 + P_{ferot1} \right) \\ &= 80 - \left(3 \cdot 2,2 \cdot \left(\frac{3,859}{\sqrt{3}} \right)^2 + 3 \right) = 44,24 \text{ W} \end{aligned} \quad (2.42)$$

Příkon potřebný pro pohon dvourotorového motoru:

$$\begin{aligned} P_{přikon1} &= P_{vm1} + P_{stcu1} + P_{fest1} = 1063 + 43,88 + 44,24 \\ &= 1151,12 \text{ W.} \end{aligned} \quad (2.43)$$

Elektrický výkon dodávaný do sítě generátorem:

$$\begin{aligned} P_e &= P_{opt} \cdot (1 - s_v) - P_{zh1} - (P_{stcu1} + P_{fest1} + P_{rotcu1} + P_{rotfe1}) \\ &= 1531 \cdot (1 - 0,025) - 7,1 - (43,88 + 44,24 + 11,87 + 3) \\ &= 1382,63 \text{ W.} \end{aligned} \quad (2.44)$$

Pro nabíjení elektrické sítě je důležitý skluz mezi vstupní hřídelí a výstupní hřídelí:

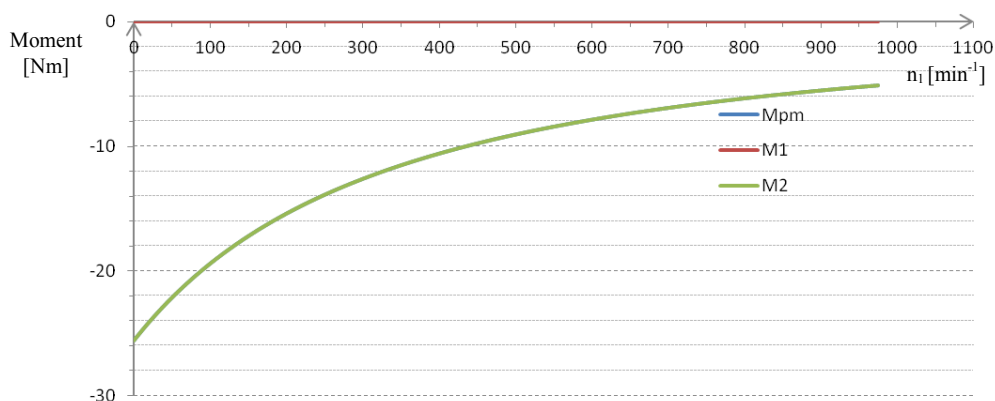
$$s_v = \frac{n_{opt} - n_1}{n_{opt}} = \frac{1000 - 975}{1000} = 0,025. \quad (2.45)$$

Hodnota P_{zh1} se vypočítá ze vztahu v kap. 2.2.2.2.

U motoru jsou výpočty totožné, až na frekvenci napájecího napětí a mechanické ztráty, které jsou u tohoto stroje nulové (všechnu mechanickou ztrátovou energii hradí generátor), proto nejsou příklady výpočtu vnitřní struktury uvedeny v dalších kapitolách.

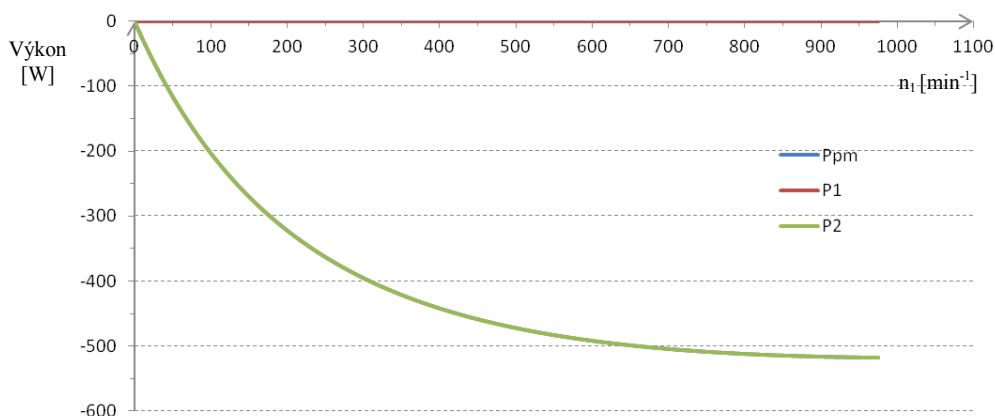
C. Simulace hybridní jednotky v režimu rekuperace

V tomto režimu bude motor pracovat v generátorickém režimu, tzn., že bude záporný výstupní výkon zachycovat a dobíjet tak bateriovou soustavu. Generátor musí mít nulový moment tak, aby nezasahoval do rovnováhy momentů v soustavě. Jeho úkolem je přeměna mechanické energie na elektrickou, bez toho aniž by sám byl zdrojem energie. Z ekonomického hlediska je tento režim nejvýhodnější, jelikož využívá naplno svůj rekuperační potenciál.



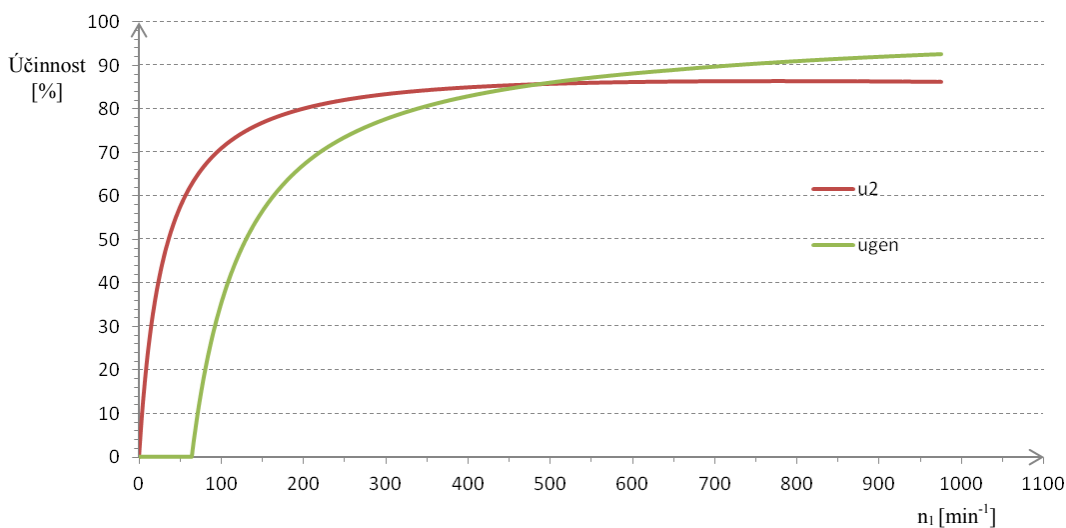
Obr. 2.21 – Moment pracovního mechanismu při rekuperaci

Na obr. 2.21 je znázorněn průběh momentu pracovního mechanismu. Moment motoru má stejnou velikost jako moment výstupní a motor tedy bude pracovat v generátorickém režimu. Generátor naopak nebude vyvíjet žádný moment, ani mechanický výkon.



Obr. 2.22 – Výkony v soustavě hybridního pohonu při rekuperaci

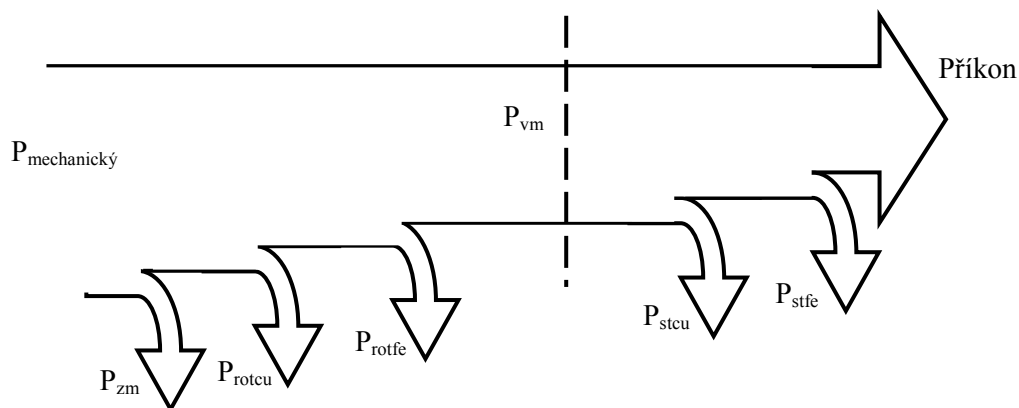
Pokud nebude generátor vyvíjet žádný moment, znamená to, že jeho synchronní otáčky budou stejné, jako výstupní rychlost otáčení hřídele, ale nadále bude zpracovávat energii ze strany spalovacího motoru.



Obr. 2.23 – Účinnosti motoru a generátoru při rekuperaci

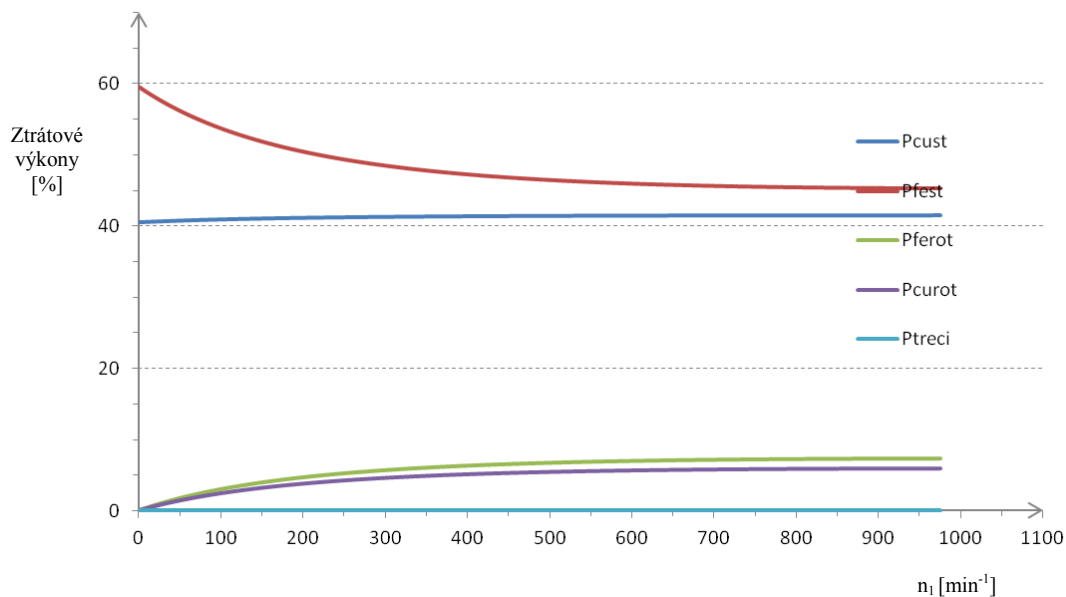
Na obr. 2.23 jsou zobrazeny účinnosti přeměny energie motoru v generátorickém režimu a účinnosti přeměny energie spalovacího motoru generátorem. Při počátečních rychlostech otáčení hřídele musí výkon spalovacího motoru překonávat ztráty v generátoru a proto je zde účinnost uvedena jako nulová (nedochází k nabíjení soustavy). Za přibližně 60 min⁻¹ začne nabíjení baterií výkonem, který je závislý na výstupní rychlosti otáčení hřídele. Tento jev je přítomen u všech režimů pohonné jednotky.

Při rekuperačním brzdění se ztráty v systému počítají obráceně, jelikož požadovaný výkon působí na soustavu jako vstupní výkon pro motor (třecí ztráty jsou kompenzovány výkonem ze strany kol, takže jsou v grafu pro motor uvedeny jako nulové).



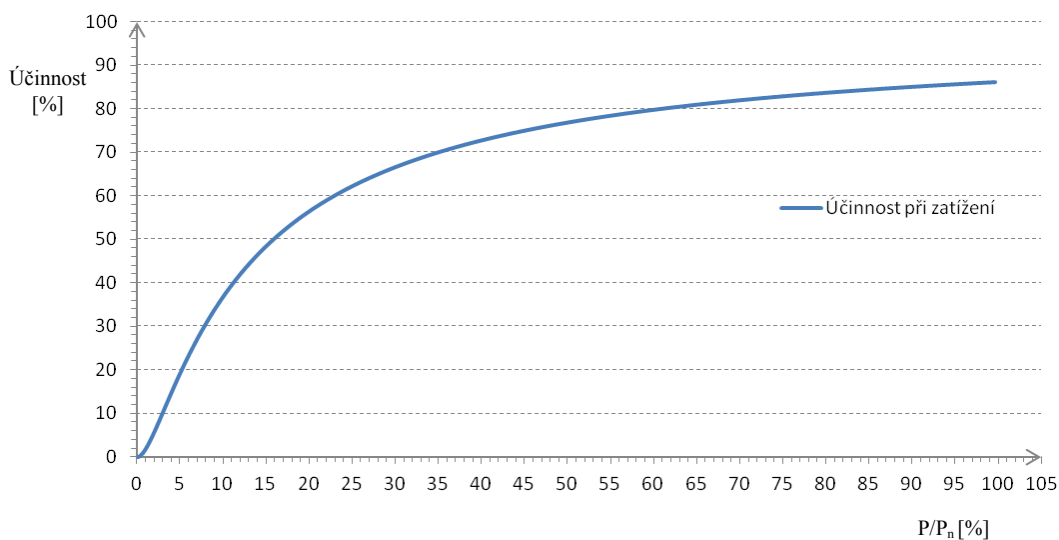
Obr. 2.24 – Účinnosti motoru a generátoru při rekuperaci

Z obr. 2.25 vyplývá, že největší ztrátovou položkou u asynchronního motoru při rekuperačním brzdění jsou ztráty ve statoru. Tyto ztráty dosahují až 85 % ztrát při jmenovitých otáčkách stroje.



Obr. 2.25– Procentuální ztráty v motoru při rekuperaci

Na obr. 2.26 je zobrazen průběh účinnosti při zátěži dvourotorového motoru. Tato účinnost je součinem účinností obou částí stroje (generátoru i motoru).



Obr. 2.26 – Účinnost při zátěži dvourotorového motoru

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit a analyzovat model hybridní pohonné jednotky s děličem výkonu ve statických i dynamických režimech.

V teoretické části jsou uvedeny možnosti zavedených koncepčních řešení pohonných jednotek hybridních vozidel s různými druhy vnitřního propojení. Je zde zavedena problematika sériového, paralelního, sériově-paralelního a komplexního uspořádání hybridní pohonné jednotky a srovnání jejich výhod i nevýhod.

Model hybridní pohonné jednotky s děličem výkonu byl navrhnut v programu Matlab Simulink. Řešení provozních stavů je zakomponováno do numerických simulací pohonné jednotky, kde je na výběr ze tří možností: režimu nulového momentu, režimu pohonu a režimu rekuperačního brzdění. Všechny tyto režimy mají společnou část, kde spalovací motor pracuje v optimálním bodě na pracovních charakteristikách. Tudíž poskytuje konstantní výkon s největší efektivitou z hlediska spotřeby paliva a dodávaného výkonu pro dvourotorový motor, který slouží jako dělič výkonu a nahrazuje tak funkci alternátoru a variabilní převodovky.

Struktura modelu hybridní pohonné jednotky s děličem výkonu je koncipována jako zjednodušený předobraz struktury reálné pohonné jednotky. Reálné hodnoty některých zadávaných parametrů bude možné s přesností určit pouze z konstrukce dvourotorového motoru (např.: odpor statorového a rotorového vinutí a také jejich indukčnosti, efektivní hodnotu poměru závitů statoru k rotoru, hmotnost statorového, rotorového a společného rotorového celku, taktéž rozměry celého dvourotorového stroje atd.). Tyto hodnoty byly zahrnuty do numerických výpočtů, ale pouze jako nejlepší odhady dle vzoru hodnot skutečných asynchronních strojů. Stejně tak se bude upravovat hodnota vstupního výkonu spalovacího motoru, jelikož byl pro výpočet v numerických simulacích použit asynchronní motor s menším výkonem (jmenovitý výkon 1,5 kW), než se běžně používají v hybridních pohonných jednotkách.

Musí se tedy dbát na přesnost zadávaných parametrů, která se poté projeví na celkové přesnosti výpočtu energetické bilance modelu.

Dle výsledků diplomové práce, se dá říci, že účinnost napříč spektrem zatěžovacího výkonu je do 75% zatěžovacího výkonu srovnatelná s jakostně vyšší třídou běžně vyráběných asynchronní motorů stejného jmenovitého výkonu. Od běžných asynchronních strojů se nepatrně liší od 90 – 100 % zatěžovacího výkonu, kdy má velmi dobrou účinnost, a to až 86,2 %. Údaj účinnosti svědčí o velmi dobré využitelnosti v oblasti hybridních vozidel. Na druhou stranu bylo u tohoto modelu použito menšího odporu vinutí jak statoru, tak v rotoru, než je tomu u výkonově stejných asynchronních motorů (tzn., že ztráty v mědi budou menší než u běžně vyráběných motorů). Také údaj o výkonu naprázdno se liší od běžné hodnoty o 20 W. Tyto rozdíly mezi skutečnými hodnotami, ověřenými měřeními skutečného modelu a hodnotami zvolenými v modelu hybridního

děliče tedy ovlivňují celkovou účinnost dvourotorového motoru. Znamená to, že účinnost celého stroje se předpokládá nižší, než je údaj vypočtený z numerické simulace.

Určitou úlohu při výpočtu účinnosti mají také frekvenční měniče, kterými bude dvourotorový motor řízen. Tyto měniče budou udržovat synchronní rychlost otáčení elektrického pole na hodnotě vhodné pro řízení asynchronního stroje, který bude pracovat se jmenovitým skluzem v celém svém funkčním rozsahu.

Další otázkou, kterou se budou muset do budoucna zabývat konstruktéři tohoto dvourotorového zařízení, bude zlepšení účinnosti stroje při vysokých otáčkách s malým dodávaným momentem. Nicméně tato část již není obsahem diplomové práce, ale vizí do budoucna při reálné konstrukci stroje. Pokud by byl tento dvourotorový motor použit jako pohon vozidla, bylo by výhodné vytvořit zařízení kombinované také se startérem spalovacího motoru (pro kompaktnost celé pohonné jednotky). Hlavním účelem této diplomové práce bylo nastínit způsob inovativního řízení hybridní pohonné jednotky.

Domnívám se, že cíl této diplomové práce se mi podařilo naplnit.

Použitá literatura a reference

- [1] E. H. Wakefield: *History of the Electric Automobile: Hybrid Electric Vehicles*, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1998, ISBN 0-7680-0125-0
- [2] Ehsani, Gao, Emadi: *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*, Second edition Illinois : CRC Press, 2010. ISBN 978-1-4200-5398-2
- [3] K. Yamaguchi, S. Moroto, K. Kobayashi, M. Kawamoto, and Y. Miyaishi: *Development of a new hybrid system-dual system*, Society of Automotive Engineers Journal, Paper No. 960231, Warrendale, PA, 1997
- [4] Y. Gao and M. Ehsani - *New Type of Transmission for Hybrid Vehicle with Speed and Torque Summation*, US Patent
- [5] Hybrid drive unit - Toyota Prius: <http://www.evworld.com/library/toyotahs2.pdf>
- [6] Y. Gao and M. Ehsani: *Series – Parallel Hybrid Drive Train with an Electric Motor of Floating Stator and Rotor*, US Patent
- [7] M. J. Hoeijmakers and J. A. Ferreira: *The electrical variable transmission*, IEEE on Industry Application, 42 (4), p. 1092–1100, July–August 2006
- [8] S. Cui, Y. Cheng, and C. C. Chan: *Abasic study of electrical variable transmission and its application in hybrid electric vehicle*, IEEE on Vehicle Power and Propulsion Conference, 2006
- [9] Ramadan El-Shatshat: *Induction Motor*, Lecture Notes ELEC A6
- [10] J. Skalický: *Elektrické regulované pohony*, skriptum VUT FEKT, Brno, 2007
- [11] T. J. E. Miller: *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*, Oxford university press, 1989. ISBN 0-19-859369-4
- [12] Syllabus - *Bureau of energy efficiency*:
http://www.beeindia.in/energy_managers_auditors/documents/guide_books/3Ch2.pdf